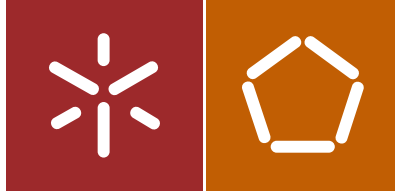


Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Francisco Alexandre Carvalho Pinheiro Vieira

Análise da Aplicação da Tecnologia
Maglev ao Transporte de Cargas
em Contexto Industrial



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Francisco Alexandre Carvalho Pinheiro Vieira

Análise da Aplicação da Tecnologia
Maglev ao Transporte de Cargas
em Contexto Industrial

Dissertação de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao Grau de
Mestre em Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor José Gerardo Vieira da Rocha

DECLARAÇÃO

Nome: Francisco Alexandre Carvalho Pinheiro Vieira

Endereço eletrónico: pinheiro.vieira@yahoo.com

Telefone: +351 967667217

Número do Bilhete de Identidade: 11519206

Título dissertação: Análise da Aplicação da Tecnologia *Maglev* ao Transporte de Cargas em Contexto Industrial

Orientador: Professor Doutor José Gerardo Vieira da Rocha

Ano de conclusão: 2015

Designação do Mestrado: Mestrado Integrado em Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA DISSERTAÇÃO/TRABALHO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE

Universidade do Minho, __/__/____

Assinatura:_____

Dedico este trabalho às minhas filhas: Carolina Maria e Ana Margarida.

(ESTA PÁGINA FOI INTENSIONALMENTE DEIXADA EM BRANCO)

Agradecimentos

Este trabalho começou a ser realizado numa fase muito especial da minha vida, com muitas exigências pessoais e profissionais, que me fazem destacar o agradecimento ao meu orientador, o Professor Gerardo Rocha, por toda a sua compreensão, suporte, atenção e muitas vezes paciência, ao longo deste meu desígnio.

Para que alcançasse este objetivo, foi fundamental todo o apoio familiar que sempre tive, por parte dos meus pais, Ana Maria e António, e pela minha mulher Carla, principal apoio nesta fase final de projeto, a quem lhes agradeço profundamente toda a confiança, condições e motivação que sempre me ofereceram.

Ainda para que este trabalho se concretizasse, dois grandes amigos que relevo e a quem lhes agradeço com toda a amizade: a Cláudia e o Luís, incansáveis no apoio que me deram ao longo da fase final do meu plano de estudos – muito obrigado!

(ESTA PÁGINA FOI INTENSIONALMENTE DEIXADA EM BRANCO)

Resumo

A mudança de paradigma energético é cada vez mais uma indiscutível certeza. Nesse sentido, faz cada vez mais sentido a necessidade de conhecer e estudar os conceitos alternativos aos serviços que utilizam os designados combustíveis fósseis. Uma tecnologia que está a merecer especial atenção nos últimos anos na área dos transportes refere-se aos sistemas *Maglev* – tecnologia maioritariamente desenvolvida no âmbito do transporte de passageiros, e que tem suscitado especial interesse principalmente devido aos seus aspetos ambientais, ao desenvolvimento de novos materiais e à capacidade que o desenvolvimento de alguns protótipos anuncia, relativamente às velocidades tangíveis.

Esta dissertação pretende fazer uma análise da adequação dos sistemas *Maglev* para o transporte de bens e mercadorias (cargas) em contexto industrial. Sendo o objeto final diferente, a priorização dos requisitos será também distinta, e vários aspetos terão que ser considerados, antes de se partir para uma solução deste género. Para ser possível realizar uma discussão desta adequação, é necessário dominar a tecnologia e as soluções existentes. Dessa forma, neste documento encontra-se uma análise cuidada ao estado da arte da tecnologia *Maglev*, bem como as suas tendências futuras. Para que se possam identificar as vantagens e desvantagens desta aplicação, também é feita uma abordagem a alguns sistemas existentes que fazem sentido de serem comparados com esta nova tecnologia, em especial o sistema ferroviário.

Os resultados desta dissertação sugerem uma lista de orientações para futuros projetos que envolvam a utilização da tecnologia *Maglev* em transporte de cargas no contexto industrial. Destas orientações salientam-se as seguintes: a importância de parcerias; construção de uma rede lógica e física de transportes *Maglev*; promoção de uma gestão de risco eficaz; entre outros.

Palavras-chaves: *Maglev*; Levitação Magnética; Sistemas de Transporte de Cargas.

(ESTA PÁGINA FOI INTENSIONALMENTE DEIXADA EM BRANCO)

Abstract

The change of energy paradigm is increasingly an indisputable certainty. So, it is very important know and study the alternative concepts to services that using so-called fossil fuels. A technology that is receiving special attention in recent years in the transport area refers to the Maglev systems – technology largely developed under the passenger transportation, and it has raised special interest mainly due to its environmental, due to development of new materials and due to its ability to develop some prototypes with tangible speeds.

This master thesis aims to analyze the adequacy of Maglev systems for the transportation of goods and merchandise (freights) in industrial context. Once the final goal is different, requirements prioritization will also be different, and many aspects must be considered before starting a solution of this kind. To make possible conduct a discussion of this adequacy, it is necessary to know the technology and the existing solutions. Thus, this document presents a careful analysis of the Maglev technology's state of the art as well as the future trends. In order to allow identify the advantages and disadvantages of this application, it is also need to make an approach to some existing systems that can be compared with this new technology, especially the rail system.

The results of this master thesis suggest a list of guidelines for future projects involving the use of Maglev technology in freight transportation. From these guidelines should be highlighted the following: the importance of partnerships; building a logical and physical network to Maglev transport; ensuring an effective risk management; among others.

Keywords: Maglev; Magnetic Levitation; Freight Transportation Systems.

(ESTA PÁGINA FOI INTENSIONALMENTE DEIXADA EM BRANCO)

Índice

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| AGRADECIMENTOS | V |
| RESUMO..... | VII |
| <i>ABSTRACT</i> | IX |
| ÍNDICE | XI |
| ÍNDICE DE FIGURAS | XIII |
| ÍNDICE DE TABELAS..... | XV |
| LISTA DE ACRÓNIMOS..... | XVII |
| CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO..... | 1 |
| 1.2. MOTIVAÇÃO..... | 6 |
| 1.3. ÂMBITO E OBJETIVOS | 7 |
| 1.4. ESTRUTURA DO DOCUMENTO..... | 8 |
| 1.5. SÍNTESE DO CAPÍTULO | 9 |
| CAPÍTULO 2. LEVITAÇÃO MAGNÉTICA (<i>MAGLEV</i>): O QUE É E PARA QUE SERVE? | 11 |
| 2.1. DEFINIÇÃO DE LEVITAÇÃO MAGNÉTICA (<i>MAGLEV</i>)..... | 11 |
| 2.2. TIPOS DE EIXOS DE TECNOLOGIA | 12 |
| 2.2.1. <i>Suspensão</i> | 13 |
| EMS (Electromagnetic Suspension) | 13 |
| EDS (Electrodynamic Suspension) | 14 |
| Análise Comparativa entre EMS e EDS | 17 |
| 2.2.2. <i>Propulsão</i> | 18 |
| Motor síncrono linear (MSL) | 19 |
| Motor de indução linear (MIL)..... | 20 |
| 2.2.3. <i>Direcionamento</i> | 21 |
| 2.2.4. <i>Transferência de Energia para o Veículo</i> | 22 |
| 2.3. EVOLUÇÃO DOS SISTEMAS <i>MAGLEV</i> | 23 |
| 2.4. ANÁLISE DOS PRINCIPAIS EXEMPLOS DE SISTEMAS <i>MAGLEV</i> | 24 |
| 2.4.1. <i>Sistema HSST</i> | 25 |
| 2.4.2. <i>Sistema Transrapid</i> | 26 |
| 2.4.3. <i>Sistema SCMaglev (MLX01)</i> | 31 |

| | | |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.4.4. | <i>Sistema Inductrack</i> | 33 |
| 2.4.5. | <i>Análise Comparativa dos Tipos de Sistemas Maglev</i> | 34 |
| 2.4.6. | <i>Comparação entre Sistemas Maglev e Sistemas Tradicionais Roda-Carril</i> | 34 |
| 2.4.7. | <i>Comparação entre os Diversos Exemplos de Comboios Maglev</i> | 35 |
| 2.5. | SÍNTESE DO CAPÍTULO | 36 |
| CAPÍTULO 3. | FUNDAMENTOS TEÓRICOS | 39 |
| 3.1. | CONCEITOS BASE: MAGNETISMO, ELETROMAGNETISMO E SUPERCONDUTIVIDADE | 39 |
| 3.1.1. | <i>Magnetismo</i> | 39 |
| 3.1.2. | <i>Eletromagnetismo</i> | 42 |
| 3.1.3. | <i>Supercondutividade</i> | 42 |
| 3.2. | LEIS RELACIONADAS COM O FENÔMENO DE MAGNETISMO | 43 |
| 3.3. | COMPONENTES ELETROMECÂNICOS | 50 |
| 3.4. | SÍNTESE DO CAPÍTULO | 55 |
| CAPÍTULO 4. | SISTEMAS DE TRANSPORTE DE BENS E MERCADORIA (CARGA) EM INDÚSTRIA | 57 |
| 4.1. | DEFINIÇÃO DE SISTEMAS DE TRANSPORTE | 57 |
| 4.2. | DESAFIOS ATUAIS DO TRANSPORTE DE BENS E MERCADORIAS | 63 |
| 4.3. | VANTAGENS E DESVANTAGENS DO TRANSPORTE FERROVIÁRIO DE BENS E MERCADORIAS..... | 65 |
| 4.4. | EXEMPLOS DE UM SISTEMA DE TRANSPORTE FERROVIÁRIO DE BENS E MERCADORIAS: O <i>JUICE TRAIN</i> E O <i>RAILEX</i> ... 66 | |
| 4.5. | SÍNTESE DO CAPÍTULO | 68 |
| CAPÍTULO 5. | APLICAÇÕES DA TECNOLOGIA <i>MAGLEV</i> AOS TRANSPORTES DE CARGA EM INDÚSTRIA | 69 |
| 5.1. | SOLUÇÕES ATUAIS..... | 69 |
| | Sistema MagneMover LITE | 70 |
| | Sistema QuickStick LSM | 72 |
| 5.2. | VANTAGENS E DESVANTAGENS DAS SOLUÇÕES ATUAIS PARA OS TRANSPORTES DE CARGA | 76 |
| 5.3. | TENDÊNCIAS E DESAFIOS FUTUROS | 79 |
| 5.4. | SÍNTESE DO CAPÍTULO | 82 |
| CAPÍTULO 6. | CONCLUSÕES | 85 |
| 6.1. | ORIENTAÇÕES PARA FUTUROS PROJETOS..... | 85 |
| 6.2. | DISCUSSÃO DE RESULTADOS..... | 88 |
| 6.3. | LIMITAÇÕES..... | 91 |
| 6.4. | TRABALHO FUTURO..... | 91 |
| REFERÊNCIAS | | 93 |

Índice de Figuras

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 1 – EXEMPLO DE UM SUPERCONDUTOR A LEVITAR UM ÍMAN PERMANENTE | 2 |
| FIGURA 2 – PRINCIPAIS ÁREAS DE APLICAÇÕES DA TECNOLOGIA <i>MAGLEV</i> | 4 |
| FIGURA 3 – EXEMPLO DE BOLA DE FERRO SUSPensa NO AR ATRAVÉS DA ATIVAÇÃO DE ELETROÍMANES COM SISTEMA DE CONTROLO | 12 |
| FIGURA 4 – EXEMPLO DE SISTEMA EMS | 13 |
| FIGURA 5 – EXEMPLO DE UM SISTEMA EDS..... | 15 |
| FIGURA 6 – EXEMPLOS DE SISTEMAS PM E SCM NO ÂMBITO DOS SISTEMAS EDS | 17 |
| FIGURA 7 – UTILIZAÇÃO DE UM ML DE UM MOTOR ROTATIVO..... | 18 |
| FIGURA 8 – ESQUEMA DE UM ÍMAN PERMANENTE NO INDUTOR | 19 |
| FIGURA 9 – UTILIZAÇÃO DE UM MIL..... | 20 |
| FIGURA 10 – BOBINAS DE LEVITAÇÃO ORIENTADA UTILIZADAS NO MODELO MLX | 21 |
| FIGURA 11 – INTERAÇÃO DE FORÇAS ENTRE VEÍCULO E <i>GUIDEWAY</i> | 22 |
| FIGURA 12 - DIAGRAMA DO DESENVOLVIMENTO DOS SISTEMAS DE TRANSPORTES DE PASSAGEIROS <i>MAGLEV</i> | 24 |
| FIGURA 13 – EXEMPLO DO SISTEMA DE TRANSPORTE URBANO – O LINIMO HSST | 25 |
| FIGURA 14 – PRINCIPAIS EVENTOS HISTÓRICOS RELACIONADOS COM O SISTEMA HSST | 26 |
| FIGURA 15 – ESTRUTURA DO <i>GUIDEWAY</i> DO SISTEMA <i>TRANSRAPID</i> | 29 |
| FIGURA 16 – FUNCIONAMENTO DO CENTRO DE CONTROLO DO SISTEMA <i>TRANSRAPID</i> | 30 |
| FIGURA 17 – CARACTERÍSTICAS DA <i>GUIDEWAY</i> DO SISTEMA <i>TRANSRAPID</i> | 31 |
| FIGURA 18 – EXEMPLO DO SISTEMA <i>MAGLEV</i> MLX..... | 32 |
| FIGURA 19 – LINHAS DE FORÇA | 40 |
| FIGURA 20 – RELAÇÕES ENTRE POLOS DE ÍMANES | 41 |
| FIGURA 21 – EQUAÇÕES DE MAXWELL EM NOTAÇÃO MODERNA | 44 |
| FIGURA 22 – LEI DE FARADAY | 44 |
| FIGURA 23 – LEI DE LENZ | 45 |
| FIGURA 24 – CONFIGURAÇÃO RESULTANTE DAS LINHAS DE FLUXO NO EFEITO MEISSNER..... | 46 |
| FIGURA 25 – DIREÇÃO DO FLUXO MAGNÉTICO GERADO PELA CORRENTE I | 46 |
| FIGURA 26 – LEI DE BIOT-SAVART | 47 |
| FIGURA 27 – LEI DE AMPÈRE: REGRA DA MÃO DIREITA PARA DETERMINAR O CAMPO MAGNÉTICO GERADO PELA CORRENTE NO FIO | 47 |
| FIGURA 28 – EFEITO DE HALL | 48 |
| FIGURA 29 – EFEITO HALL E FORÇA DE LORENTZ | 49 |
| FIGURA 30 – EXEMPLOS DE ÍMANES PERMANENTES | 51 |
| FIGURA 31 – EXEMPLO DE UM SOLENOIDE | 52 |
| FIGURA 32 – EXEMPLO DE UM ELETROÍMAN | 53 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 33 – DIVERSAS APLICAÇÕES DO TRANSPORTE INTERNO | 58 |
| FIGURA 34 – OS CINCO MODAIS DE TRANSPORTES EXTERNOS | 59 |
| FIGURA 35 – TIPOS DE TRANSPORTES UTILIZADOS NA UNIÃO EUROPEIA EM 2006 | 62 |
| FIGURA 36 – ASPETOS RELEVANTES PARA SELECIONAR O TIPO DE TRANSPORTE | 63 |
| FIGURA 37 – SISTEMA MODULAR DO <i>MAGNEMOVER LITE</i> | 71 |
| FIGURA 38 – RESUMO DAS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA <i>MAGNEMOVER LITE</i> | 71 |
| FIGURA 39 – COMPONENTES DO SISTEMA <i>QUICKSTICK LSM</i> | 72 |
| FIGURA 40 – RESUMO DAS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA <i>QUICKSTICK LSM</i> | 73 |
| FIGURA 41 – PRIMEIRO SISTEMA <i>MAGLEV</i> DA GA | 74 |
| FIGURA 42 – PRINCIPAIS COMPONENTES DO SISTEMA ECCO DA GA | 75 |
| FIGURA 43 – PROTÓTIPO PARA TRANSPORTE DE BENS E MERCADORIA DA PARCERIA SIEMENS, THYSSENKRUPP E <i>TRANSRAPID</i> | 76 |
| FIGURA 44 – ANÁLISE DE CUSTOS DE SISTEMAS RODA-CARRIL TRADICIONAIS E SISTEMAS <i>MAGLEV</i> | 78 |
| FIGURA 45 – SISTEMA INOVADOR CHINÊS DESENVOLVIDO NA UNIVERSIDADE SOUTHWEST JIAOTONG | 80 |
| FIGURA 46 – RESUMO DOS FATORES QUE INFLUENCIAM A DECISÃO DE APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA <i>MAGLEV</i> | 87 |

Índice de Tabelas

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| TABELA 1 – PRINCIPAIS OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO | 8 |
| TABELA 2 – VANTAGENS E DESVANTAGENS DA SUSPENSÃO EMS E EDS | 18 |
| TABELA 3 – COMPARAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS <i>MAGLEV</i> E DOS SISTEMAS RODA-CARRIL TRADICIONAIS..... | 35 |
| TABELA 4 – COMPARAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DOS EXEMPLOS SISTEMAS <i>MAGLEV</i> | 36 |
| TABELA 5 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DISTINTIVAS DOS PM, ELETROÍMANES E SUPERCONDUTORES | 54 |
| TABELA 6 – LISTA DE ORIENTAÇÕES PARA PROJETOS FUTUROS ENVOLVENDO A TECNOLOGIA <i>MAGLEV</i> EM TRANSPORTES DE CARGA NO CONTEXTO INDUSTRIAL | 88 |

(ESTA PÁGINA FOI INTENSIONALMENTE DEIXADA EM BRANCO)

Lista de Acrónimos

| | |
|-----------------|--------------------------------------|
| AlNiCo | <i>Alnico</i> |
| Central JR | <i>Central Japan Railway Company</i> |
| CO ₂ | <i>Dióxido de Carbono</i> |
| ECCO | <i>Electric Cargo CONveyor</i> |
| EDS | <i>Electrodynamic Suspension</i> |
| EMS | <i>Electromagnetic Suspension</i> |
| FEM | Força eletromotriz induzida |
| GA | <i>General Atomics</i> |
| HSST | <i>High Speed Surface Transport</i> |
| ICE | <i>InterCity Express</i> |
| PM | Ímãs permanentes |
| SCM | Ímãs supercondutores |
| Km | Quilômetros |
| Km/h | Quilômetros por hora |
| <i>Maglev</i> | <i>Magnetic Levitation</i> |
| Hg | Mercúrio |
| MIL | Motor de Indução Linear |
| MSL | Motor Síncrono Linear |
| NdFeB | Neodímio-Ferro-Boro |
| NdFeB | Neodymium Iron Boron |
| UK | Reino Unido |

| | |
|------|-------------------------------|
| RZD | <i>Russian Railways</i> |
| SmCo | <i>Samarium Cobalt</i> |
| TGV | <i>Train à Grande Vitesse</i> |
| TKM | Toneladas quilómetro |

Capítulo 1. Introdução

A temática desta dissertação diz respeito à utilização da tecnologia *Maglev* em sistemas de transporte de cargas no contexto industrial. Assim, este capítulo tem como principal objetivo fornecer uma visão global desta temática, salientando a sua importância. Após uma breve contextualização, é apresentada a motivação para este estudo. De seguida, são identificados o âmbito e os objetivos a que esta dissertação se propõe. No final do capítulo, é apresentada a organização da presente dissertação.

1.1. Contextualização

Nos dias de hoje, a flexibilidade e adequação de novas tecnologias está cada vez mais em voga. O engenho de converter tecnologias desenvolvidas com uma determinada finalidade em novas aplicações é empregue no desenvolvimento nas mais diversas áreas tecnológicas. Esta dissertação pretende ir ao encontro dessa tendência.

Através da realização de um estudo profundo dos sistemas *Maglev* (expressão proveniente do inglês *Magnetic Levitation*), concebidos originalmente para o transporte de passageiros, pretende-se analisar a aplicabilidade desta tecnologia à área de transportes de cargas em contexto industrial. Apesar de haver inúmeras utilizações possíveis para os princípios da levitação magnética, a mais importante utilização encontra-se atualmente no transporte de passageiros, através de comboios magneticamente levitados.

Os sistemas *Maglev* utilizam as forças magnéticas para elevar, propulsar e guiar um veículo sobre uma estrutura especial (*guideway*) (American Maglev, 2006). Esta aplicação das forças magnéticas resultou do estudo do estado de arte da energia elétrica e dos sistemas de controlo. O princípio destes sistemas é a levitação magnética, processo que representa a capacidade através

da qual é possível suspender um objeto no ar apenas e só com o suporte de um campo magnético (ver Figura 1). O princípio da levitação magnética já é conhecido há mais de 100 anos, quando o cientista Robert Goddard e o cientista Emile Bachelet conceberam comboios sem atrito (Yaghoubi, 2012). Para que este fenómeno ocorra, a força magnética terá que contrariar a força gravítica do objeto e/ou outra qualquer aceleração (American Maglev, 2006).

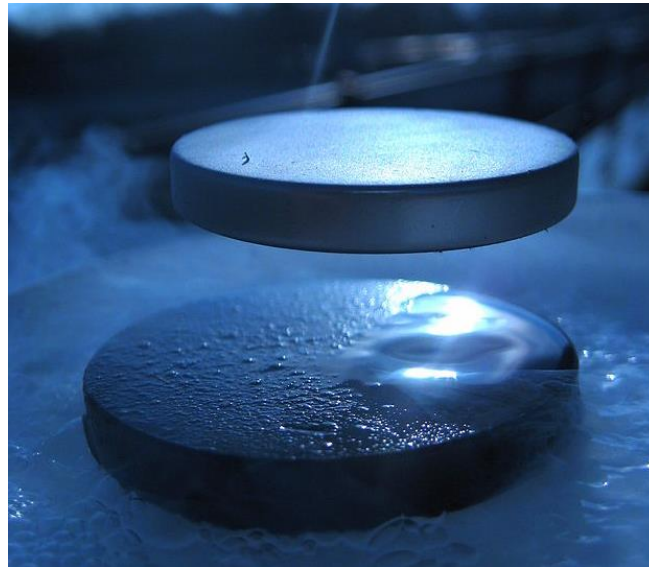


Figura 1 – Exemplo de um supercondutor a levitar um íman permanente (Fonte: (CNRS, SFP, & RTRA, n.d.))

A configuração destes sistemas permite genericamente reduzir, ou eliminar, a necessidade de rodas e de muitos outros componentes, reduzindo a fricção, permitindo grandes acelerações e alcançando grandes velocidades. De um modo geral, as principais vantagens atribuídas aos sistemas *Maglev* são: o aumento da eficiência, redução de custos de manutenção, ausência de ruído, diminuição da poluição do ar, e o aumento do tempo de vida dos sistemas, sendo que estes benefícios ocorrem sobretudo devido à inexistência de desgaste mecânico entre a infraestrutura o veículo (American Maglev, 2006; Antlauf, Bernardeau, & Coates, 2004; Yaghoubi, 2012). Contudo, o elevado investimento inicial tem sido o principal entrave da utilização desta tecnologia (Antlauf et al., 2004; Yaghoubi, 2012).

Como referido, atualmente existe também a aplicação da tecnologia *Maglev* nas mais diversas áreas, das quais se salientam: (1) na produção de energia, como por exemplo em turbinas de vento (ver Figura 2 – ii); (2) na produção de material bélico, como por exemplo armas e *rockets*; (3) na engenharia nuclear, como por exemplo em centrifugação de um reator nuclear; (4) na engenharia civil, como por exemplo em elevadores de cargas; (5) na área dos transportes (ver Figura 2 – i); (6) na engenharia aeroespacial (ver Figura 2 – iii); (7) na biomédica (ver Figura 2 – iv); (8) na engenharia mecânica e de automóveis (ver Figura 2 – vi); entre outros.

Apesar de ser na área dos transportes que a tecnologia *Maglev* tem tido especial destaque na literatura (Yaghoubi, 2012), o interesse também se verifica no ramo da indústria em geral e, de facto, cada vez mais surge o interesse em aplicações neste sector em função das suas vantagens. Atualmente, vários países estão a realizar investigações e desenvolver estes sistemas, verificando-se na última década um alargamento desta tecnologia dentro dos países desenvolvidos (Yaghoubi, 2012). A levitação magnética pode ser considerada como uma solução para as necessidades futuras do planeta. Este pensamento, iniciado no projeto de sistemas de transporte de passageiros, que funcionou como principal foco do interesse por todo o mundo, não se cingiu apenas a essa utilização e começou a ser encarado do ponto de vista da engenharia na sua globalidade.



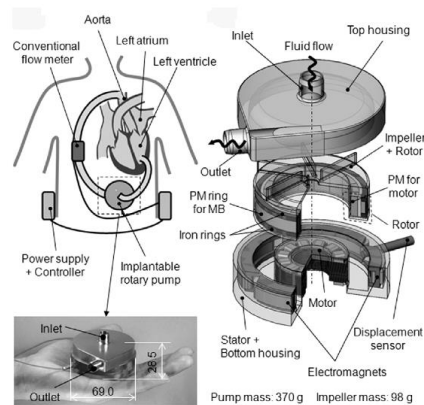
(i) Engenharia de transportes – comboio *Maglev* em Shangai
(Fonte: (Antlauf et al., 2004))



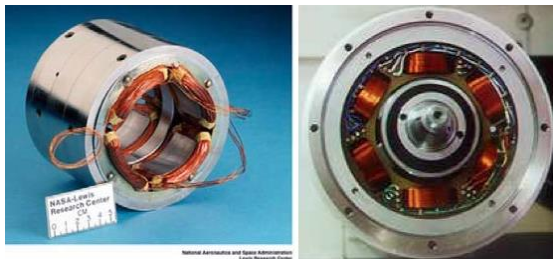
(ii) Engenharia do Ambiente – turbina de vento *Maglev*
(Fonte: (Yaghoubi, 2012))



(iii) Engenharia aeroespacial – Protótipo de uma nave espacial *Maglev* (Fonte: (Yaghoubi, 2012))



(iv) Engenharia Biomédica – bomba de centrifugação sanguínea *Maglev* (Fonte: (Yaghoubi, 2012))



(v) Engenharia Eletrotécnica – Rolamentos magnéticos *Maglev*
(Fonte: (Yaghoubi, 2012))



(vi) Engenharia mecânica e automóvel – Carro do futuro *Maglev* (Fonte: (Yaghoubi, 2012))

Figura 2 – Principais áreas de aplicações da tecnologia *Maglev*

Analisado o potencial desta tecnologia nas diversas áreas de engenharia, uma das principais questões relativamente à sua utilização está relacionada com o seu investimento inicial. Como exemplo, o investimento total do comboio *Maglev* em Shangai (ver Figura 2 – i) foi, aproximadamente, de 1,2 bilhão de dólares, o que inclui: os custos de infraestrutura; os direitos de passagem; a extensa cravação de estacas; a produção do trilho (*guideway*); uma instalação de manutenção; um parque para os veículos; os vários *switches*; as duas estações; as operações e os

sistemas de controlo; o sistema de alimentação de energia; os cabos e os inversores; e a formação operacional (Antlauf et al., 2004).

Em 2006, o governo alemão investiu aproximadamente 125 milhões de dólares com o objetivo de reduzir os custos na construção de infraestruturas dos sistemas *Maglev*, o que resultou num projeto de um trilho modular cujo tempo de construção foi reduzido em mais de 30% comparativamente ao projeto de Shanghai (Antlauf et al., 2004).

Relativamente aos custos de infraestruturas, os comboios *Maglev* de alta velocidade são relativamente dispendiosos quanto à sua construção comparativamente a sistemas de roda-carril convencionais (The International Maglevboard, n.d.-a). Relativamente aos custos de manutenção, os sistemas *Maglev* não apresentam deterioração das suas partes mecânicas, pelo que são mais económicos que os sistemas convencionais, uma vez que estes últimos apresentam uma regular e dispendiosa manutenção em função da erosão das partes mecânicas, que é exponencialmente proporcional ao aumento da velocidade (The International Maglevboard, n.d.-a). É importante salientar que os sistemas *Maglev* representam o único sistema de transporte de carris que praticamente não têm atrito mecânico durante a operação. Como resultado, os custos de manutenção de alguns sistemas *Maglev* são apenas uma fração dos custos dos sistemas de roda-carril tradicionais (The International Maglevboard, n.d.-a). Relativamente aos custos de operação, nos sistemas convencionais as rodas não se encontram protegidas, o que acentua o desgaste quer das rodas quer da superfície do carril. A título de exemplo, sabe-se que cada roda do comboio *InterCity Express* (ICE) perde cerca de 68 kg de aço devido à fricção durante os processos de condução e travagem (The International Maglevboard, n.d.-a). Tipicamente, em dois ou três anos, um comboio ICE perde aproximadamente 8 toneladas de aço.

O primeiro comboio *Maglev* japonês de baixa velocidade, chamado de Linimo – *High Speed Surface Transport* (HSST) –, atinge os 100 km/h (quilómetros por hora), e está atualmente operacional. Este projeto teve um investimento inicial de aproximadamente 50 milhões dólares/km. Todavia, este projeto oferece custos de operação e manutenção bastante mais atrativos em relação a outros sistemas de trânsito, bem como benefícios como maior confiabilidade operacional, menor ruído e menor poluição (The International Maglevboard, n.d.-a).

Em suma, a tecnologia *Maglev* permite suspender um objeto no ar, utilizando um campo magnético. Apesar dos custos de infraestruturas serem superiores aos dos sistemas de roda-carril convencionais, os custos de manutenção e de operação tornam a utilização desta tecnologia atrativa em diversas áreas.

1.2. Motivação

Como referido, dentro das principais características dos sistemas *Maglev* destacam-se: a alta velocidade, a segurança, os reduzidos custos de manutenção, a autonomia, a poupança de energia e a proteção ambiental. Essas principais mais-valias poderão ser as razões que originem uma reforma da tecnologia existente na gestão do transporte de bens e mercadorias, geridos pelos departamentos de logística das empresas. Face a estas razões, e entendendo que podemos estar perante uma alternativa aos sistemas convencionais de transporte, uma das principais motivações funda-se em encontrar vantagens que estes novos modelos possam representar, comparativamente com os modos tradicionais de transporte de cargas. Para cumprir com este objetivo, serão estabelecidos alguns indicadores estratégicos, tais como: a complexidade tecnológica, nível de investimento, custos de manutenção, entre outros, que pretendem suportar futuras decisões de implementação destas soluções.

No que concerne aos aspetos económicos, o estudo realizado deverá refletir os custos nos diferentes ciclos de vida do sistema, como por exemplo: planeamento, construção, implementação, operação e manutenção. Esta avaliação deverá refletir todos os custos de todos os processos do tempo de vida do sistema, ou seja, não se deverá apenas realizar uma comparação com os sistemas convencionais apenas ao nível do investimento inicial, mas deverão ser considerados os custos de operação e manutenção, visando a melhor solução técnica e económica.

Relativamente à complexidade tecnológica, será realizada uma classificação com base nos modos de levitação e nos seus componentes, e também nos sistemas de controlo necessários para garantir a estabilidade do sistema. Outros aspetos, tais como questões ambientais e capacidade de transporte, também serão considerados neste âmbito.

Uma vez categorizados estes parâmetros, será realizado um modelo que permita classificar e comparar os vários modelos e soluções existentes.

A literatura é fracionada e não abundante na caracterização de projetos de utilização da tecnologia *Maglev* em sistema de transporte de cargas no contexto industrial, pelo que não existe uma abordagem que agregue dimensões críticas de projetos que envolvam a tecnologia *Maglev*, sendo portanto esta a principal motivação da presente dissertação.

1.3. Âmbito e Objetivos

Esta dissertação tem como principal objetivo ser um ponto de partida para todos aqueles que estiverem a considerar desenvolver ou melhorar um sistema de transporte de cargas em contexto industrial, utilizando a tecnologia *Maglev*. Através de uma lista de referências abrangente, é apresentado um estado da arte relevante, de modo a apresentar uma visão abrangente do que é, para que serve, que modelos existem, como foi desenvolvido, onde é utilizado, qual é o estado atual desta tecnologia nesta utilização, bem como as tendências futuras, neste tópico. Apesar de não realizar um desenvolvimento prático como base, esta dissertação pretende expor toda a base teórica e documental essencial a quem começa a trabalhar nesta tecnologia.

Com o conhecimento adquirido pelo estudo proposto desta tecnologia na área do transporte de passageiros, e da sua grande diversidade de soluções, este trabalho pretende ainda determinar, dentro dos requisitos que o transporte de cargas e mercadorias encerra, as principais orientações para o desenvolvimento de soluções nesta área. Deste modo, o principal resultado esperado desta dissertação é uma lista de orientações e recomendações para projetos que envolvam a aplicação da tecnologia *Maglev* em transportes de carga no contexto industrial. Uma vez que atualmente existem projetos em curso, e identificando ainda um pequeno conjunto de soluções já desenvolvidas, é ao mesmo tempo realizada uma discussão sobre estas, sugerindo melhorias ou alterações às mesmas.

Em modo de síntese, a Tabela 1 resume os principais objetivos a que esta dissertação se propõe a responder.

Tabela 1 – Principais objetivos da dissertação

| Identificador | Objetivo | Importância |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| 01 | Obter um estado da arte atual, abrangente e relevante na área da tecnologia <i>Maglev</i> | MA |
| 02 | Apresentar a definição, a finalidade, as vantagens e as desvantagens da tecnologia <i>Maglev</i> | M |
| 03 | Determinar os requisitos e as condições para a utilização da tecnologia <i>Maglev</i> em transporte de cargas em contexto industrial | M |
| 04 | Propor uma lista de orientações para futuros projetos que envolvam a utilização da tecnologia <i>Maglev</i> em transporte de cargas no contexto industrial | A |

Legenda: A – alta | MA – média alta | M – média

1.4. Estrutura do Documento

A presente dissertação está estruturada em 6 capítulos, de modo a atingir os objetivos propostos – apresentados na Tabela 1.

O presente capítulo apresenta uma visão alto nível do tema desta dissertação. Inicialmente, o capítulo demonstra a importância da temática em estudo. Além disto, são também definidos o âmbito e os objetivos que se pretende alcançar com a realização desta dissertação.

No capítulo 2 pretende-se dar uma definição consistente da tecnologia em estudo, ilustrando os tipos de eixos existentes, os modos de suspensão e propulsão, e ainda é realizada uma abordagem relativamente ao direcionamento e transferência de energia para o veículo. Também no capítulo 2, é apresentada uma resenha histórica onde se descrevem os diferentes avanços da tecnologia *Maglev* ao longo do tempo, e se referem os casos de sucesso identificados ao longo de todo o mundo. Por fim, é realizada uma comparação das características dos sistemas *Maglev* com os sistemas roda-carril tradicionais.

No capítulo 3 encontram-se os principais fundamentos teóricos que servem de base ao desenvolvimento da tecnologia *Maglev*. Isto inclui abordar conceitos como magnetismo, eletromagnetismo e supercondutividade. Ainda no âmbito deste capítulo, são apresentados também os componentes eletromecânicos que fazem parte desta tecnologia.

No capítulo 4 são apresentados os tipos de transporte utilizados na indústria, dividindo-os em transportes internos e externos, de modo a identificar, para cada um, as suas vantagens, as suas desvantagens e alguns exemplos relevantes.

No capítulo 5 são apresentadas as aplicações conhecidas da tecnologia *Maglev* no âmbito do transporte de carga em indústria, realizando uma análise crítica sobre as vantagens e as desvantagens destas aplicações. Na parte final do capítulo, apresentam-se as tendências e os desafios futuros da tecnologia *Maglev*, identificando alguns protótipos relevantes atualmente em desenvolvimento.

No último capítulo, são sugeridas orientações para futuros projetos e é realizada uma discussão dos resultados obtidos nesta dissertação. De seguida, são apresentadas as limitações deste trabalho de investigação e são propostos trabalhos futuros.

1.5. Síntese do Capítulo

Este capítulo deu a conhecer o propósito da presente dissertação, que corresponde ao estudo da utilização da tecnologia *Maglev* em transporte de cargas no contexto industrial. Esta tecnologia utiliza as forças magnéticas para elevar, propulsar e guiar um veículo sobre uma estrutura especial (*guideway*). A aplicação desta tecnologia verifica-se em diversas áreas como por exemplo: no setor de energia, na engenharia civil, na área dos transportes, na engenharia mecânica e de automóveis, entre outros.

O restante capítulo apresentou, respetivamente: a motivação, o âmbito e os objetivos e, por último, a organização da presente dissertação.

(ESTA PÁGINA FOI INTENSIONALMENTE DEIXADA EM BRANCO)

Capítulo 2. Levitação Magnética (*MagLev*): O Que É e Para Que Serve?

Inicialmente, o presente capítulo apresenta uma definição consistente da tecnologia *Maglev*, dando a conhecer os princípios base desta tecnologia. Este capítulo apresenta posteriormente os diversos tipos de tecnologia *Maglev* existentes – como são exemplos os modos de suspensão: *Electromagnetic Suspension* (EMS); *Electrodynamic Suspension* (EDS), e o tipo de motores utilizados: Motor Síncrono Linear (MSL); e Motor de Indução Linear (MIL) –, salientando as principais características de cada um. De seguida, é apresentada uma visão história do conceito de *Maglev*, desde a criação do conceito até ao estado atual.

Além disso, este capítulo dá a conhecer os principais exemplos de sistemas *Maglev* existentes, como o HSST, o *Transrapid* e o *Inductrack*, onde são apresentadas as características diferenciadoras de cada um. Numa fase final do capítulo, são identificadas as vantagens e as desvantagens dos principais sistemas *Maglev*. No final, são resumidos os conteúdos versados no capítulo.

2.1. Definição de Levitação Magnética (*Maglev*)

Tal como já referido, a levitação magnética (ou apenas *Maglev*) é um fenómeno físico através do qual é possível suspender um qualquer objeto na atmosfera apenas com o suporte de um campo magnético. Isto significa que os comboios *Maglev* são sistemas em que não se verifica contacto entre o veículo e a *guideway*. Para que isto aconteça, é necessário a existência de duas condições: (1) que se gere uma força de elevação (força de atração ou força de repulsão), essencial para contrariar as acelerações impostas ao corpo, fornecendo orientação e prevenindo deslocamentos laterais, e (2) que se criem condições de estabilidade do sistema, para que não surjam deslizamentos espontâneos, e se mantenha assim a força de elevação controlada (Lee, Kim, & Lee,

2006). A condição (1) determina o tipo de sistema *Maglev* (ver próxima secção). Para promover uma força de elevação, vários componentes eletromecânicos podem ser utilizados, como por exemplo: ímanes permanentes, eletroímãs (ver Figura 3) e bobinas supercondutoras.



Figura 3 – Exemplo de bola de ferro suspensa no ar através da ativação de eletroímãs com sistema de controlo (Fonte: MIT (2015))

Apesar do fenómeno *Maglev* ser utilizado em diversas aplicações – já identificadas no capítulo anterior –, esta dissertação foca os conceitos teóricos na levitação magnética enquanto fenómeno físico que suporta os sistemas *Maglev* de transporte de passageiros, uma vez que é a mais recorrente. Dentro do universo destes sistemas, existem diversas possibilidades construtivas e, como tal, diferentes soluções que são seguidamente abordadas.

2.2. Tipos de Eixos de Tecnologia

As diferentes arquiteturas existentes nos sistemas *Maglev* podem ser dadas quanto ao tipo de tecnologia utilizada. Dentro desta categoria, podemos ainda fazer uma divisão em quatro eixos de desenvolvimento, nomeadamente: 1) suspensão, 2) propulsão, 3) direcionamento, e 4) transferência de energia para o veículo. Cada um destes quatro eixos é abordado de seguida.

2.2.1. Suspensão

Dentro dos modos de suspensão, podem-se dividir os sistemas *Maglev* em dois modelos principais, diferenciados pelo modo de suspensão. São estes: o *Electromagnetic Suspension* (EMS) e o *Electrodynamic Suspension* (EDS). Com base nesses dois tipos de sistema, desenvolveu-se uma grande diversidade de veículos (Lee et al., 2006).

EMS (Electromagnetic Suspension)

Nos sistemas EMS, a levitação realiza-se em função de uma força de atração magnética existente entre: a estrutura que serve de guia (*guideway*) e os eletroímãs presentes no veículo (ver Figura 4). Estes sistemas revelam elevada instabilidade, dadas as características inerentes dos sistemas magnéticos (Lee et al., 2006). Por esta razão, é necessário a presença de uma unidade de controlo, de forma a garantir uma determinada distância (*gap*) entre a estrutura e o veículo, que assegura as condições de estabilidade e segurança necessárias. Esta necessidade, em garantir uma determinada distância, encontra problemas acrescidos à medida que velocidade do veículo aumenta (Lee et al., 2006). Este método de suspensão é tecnicamente simples, pois é possível alcançar a levitação sem velocidade inicial, o que é problemático nos métodos de suspensão alternativos, como será referido posteriormente.

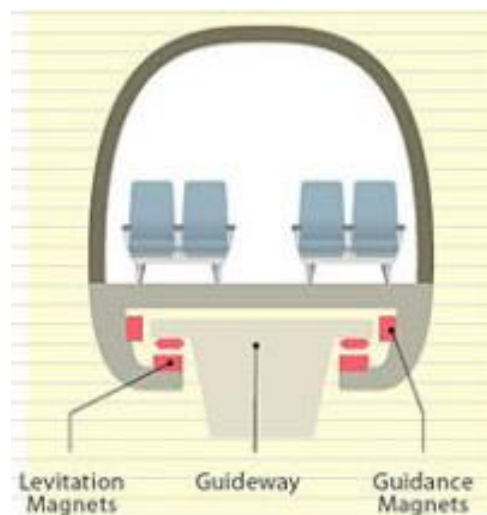


Figura 4 – Exemplo de sistema EMS (Fonte: (Kassim, Shaikh, Zainal, & Khairulanam, 2008))

Dentro do tipo de sistemas EMS, podem-se ainda dividir dois modelos existentes: (1) os sistemas em que a levitação e o direcionamento se encontram integrados, como o exemplo do caso japonês HSST; e (2) os sistemas em que a levitação e o direcionamento se encontram separados, como o exemplo do caso alemão *Transrapid*. Este último modelo é mais favorável em operações de alta velocidade, pois a levitação e o direcionamento não interferem entre si, em contrapartida o número de controladores necessários é superior. O primeiro modelo é mais favorável em operações de menor velocidade, pois o número de eletroímãs e controladores é mais reduzido, o que resulta em menores custos associados. Note-se que o valor dos consumos elétricos do tipo integrado – primeiro modelo – é menor do que no tipo separado – segundo modelo –, mas, como a velocidade aumenta, a interferência entre a levitação e orientação aumenta, sendo mais difícil controlar a levitação e a orientação, simultaneamente, no tipo integrado (He, Rote, & Coffey, 1993).

A tecnologia EMS utiliza, geralmente, eletroímãs, mas, hoje em dia, existem muitos relatórios aconselhando a utilização de supercondutores, que normalmente são utilizados na tecnologia EDS (ver próxima secção). O desenvolvimento de supercondutores de elevada temperatura cria um campo magnético muito mais poderoso e económico, comparativamente aos eletroímãs, mesmo pensando nos problemas existentes, como a necessidade de um sistema de arrefecimento.

EDS (Electrodynamic Suspension)

Enquanto os sistemas EMS empregam forças atrativas para alcançar a levitação, os sistemas EDS realizam-na através de forças repulsivas (Kassim et al., 2008; Lee et al., 2006; Zhang, Fang, Song, Zhu, & Wang, 2004). Este fenómeno ocorre através da força entre o campo magnético gerado na estrutura, por efeito de uma bobina, e os ímãs permanentes colocados no veículo (ver Figura 5).

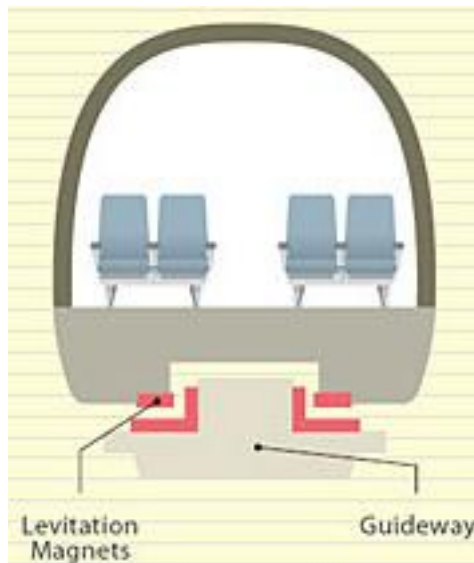


Figura 5 – Exemplo de um sistema EDS (Fonte: (Kassim et al., 2008))

Os sistemas EDS são considerados magneticamente estáveis, e não necessitam de controlar o *gap* que se gera entre a estrutura e o veículo. Atendendo a estas características, este método é interessante sobretudo para sistemas de alta velocidade. Todavia, um ponto desfavorável nestes sistemas é o facto de necessitarem de uma determinada velocidade para que se produzam as correntes induzidas necessárias ao fenómeno da levitação, sendo preciso utilizar um sistema acessório para alcançar velocidades até 100 km/h (Lee et al., 2006; Zhang et al., 2004).

Em função do tipo de ímãs utilizados, pode-se dividir os sistemas EDS em dois modelos: (1) ímãs permanentes (PM), e (2) ímãs supercondutores (SCM). Ambos são analisados nos próximos parágrafos.

No tipo PM, a estrutura é muito simples, pois não é necessário um fornecedor de corrente elétrica. Este último tipo, durante muito tempo, apenas foi utilizado para pequenos sistemas, dada a inexistência de PM de elevada capacidade. Entretanto, nos dias de hoje, estão a ser introduzidas soluções de levitação e de propulsão nos comboios *Maglev – Inductrack* (dos USA), que apresentam grande capacidade de levitação (Halbach, 1985). Nos sistemas do tipo SCM, a estrutura é bem mais complexa, uma vez que utilizam a evaporação do hélio líquido, que pode causar problemas durante a operação (Lee et al., 2006).

O conceito de PM depende basicamente de dois componentes principais: (1) uma ou mais matrizes de PM, que neste tipo de sistema são de Neodímio-Ferro-Boro (NdFeB), capazes de produzir um campo oscilante, e (2) uma pista formada por circuitos indutivos que irão interagir com o campo e gerar as forças de levitação, conforme ilustração na Figura 6 (parte a). De referir que o campo magnético oscilante é obtido através da utilização da matriz de *Halbach*, que consiste em dispor os ímanes permanentes lado a lado numa disposição própria, de forma que o campo resultante seja aumentado na superfície inferior e anulado na superfície superior da matriz (Halbach, 1985).

A força de levitação nos sistemas PM surge por meio da variação do fluxo magnético que atravessa os circuitos indutivos existentes na pista, que geram uma corrente induzida e, por sua vez, um campo contrário ao da indução e desta forma exerce uma força de repulsão (CiA, n.d.), permitindo que o sistema levite. A força de levitação aumenta exponencialmente com a diminuição da distância entre o carril e o comboio, proporcionando uma maior estabilidade. Para garantir uma estabilidade lateral, é também colocado lateralmente uma matriz de *Halbach*, mas de valor inferior, em ambos os lados.

Uma grande vantagem destes sistemas refere-se à ausência de consumo de energia para colocar o sistema a levitar, daí esta levitação ser designada como levitação passiva (Castro, 2012; Silva, 2012).

Sublinhe-se que, estes sistemas apenas são possíveis em função da capacidade que os PM de NdFeB possuem para criar um elevado campo magnético, não sendo necessário recorrer ao uso de bobinas supercondutoras ou de eletroímãs. A força de levitação pode chegar a 40 toneladas por metro quadrado, utilizando esta tipologia de ímanes (Post & Ryutov, 2000). A capacidade destes ímanes na relação do seu peso com o peso suportado é na ordem dos 2% (Hoburg, 2004).

Tal como já referido, nos sistemas que utilizam os SCM, a estrutura é bem mais complexa (ver Figura 6 (parte b)), devido à evaporação do hélio líquido, que é causado pelo calor produzido pelas correntes induzidas, e que pode ocasionar problemas durante a operação (Lee et al., 2006).

Em função deste aquecimento, é indispensável um sistema de refrigeração para fazer funcionar os sistemas que utilizam SCM (Sasakawa & Tagawa, 2000; Shudo et al., 1997). Refira-se que estes sistemas detêm o recorde mundial de velocidade: 581 km/h, registado em 2003 no Japão (Lee et al., 2006).

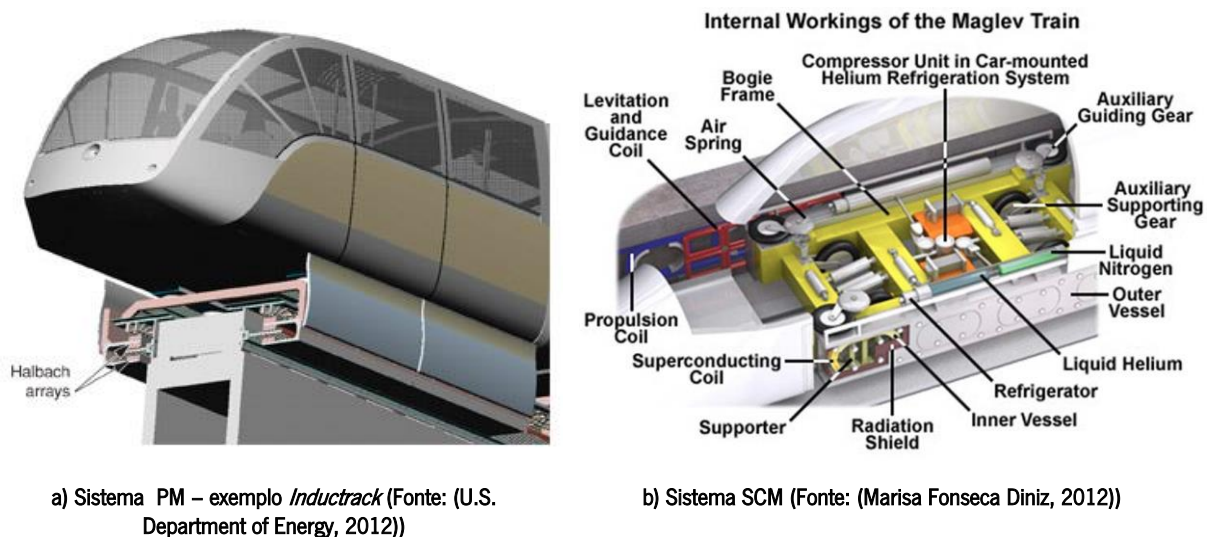


Figura 6 – Exemplos de sistemas PM e SCM no âmbito dos sistemas EDS

Análise Comparativa entre EMS e EDS

Dadas as suas características particulares, e tal como referido, o modo suspensão divide-se em dois tipos: o EMS e o EDS. A Tabela 2 visa resumir as vantagens e desvantagens destes dos tipos de suspensão.

Tabela 2 – Vantagens e desvantagens da suspensão EMS e EDS

| Tecnologia | Vantagens | Desvantagens |
|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| EMS (suspensão eletromagnética) | <p>(1) Os campos magnéticos, dentro e fora do veículo, são menores.</p> <p>(2) Podem atingir velocidades muito elevadas.</p> <p>(3) Não necessitam de rodas ou sistemas secundários de propulsão.</p> | <p>(1) A variação de altura entre veículo e guia (gap) tem que ser constantemente monitorizada e corrigida, dada a instabilidade do sistema.</p> <p>(2) Podem ocorrer problemas de vibração.</p> |
| EDS (suspensão eletrodinâmica – SCM) | <p>(1) Os campos gerados pelos supercondutores permitem maior capacidade de cargas.</p> <p>(2) O recorde de velocidade pertence a este tipo modo de suspensão.</p> | <p>(1) Os fortes campos magnéticos tornam o método inacessível a passageiros com <i>pacemakers</i> ou armazenamento magnético de dados, como cartões de créditos, sendo necessária blindagem magnética.</p> <p>(2) Necessidade de rodas para as baixas velocidades.</p> |
| EDS (Imanes permanentes – PM) | <p>(1) Não necessita de energia para ativar os ímanes. O campo magnético está localizado em baixo da viatura.</p> <p>(2) Pode gerar força de levitação suficiente em baixas velocidades.</p> <p>(3) Cadeia <i>Halbach</i> de PM é mais económica, comparativamente com outras soluções.</p> | <p>(1) Requer apoios ou outros segmentos de pista quando o veículo está parado.</p> <p>(2) Ainda não existe um protótipo do sistema em larga escala.</p> |

2.2.2. Propulsão

Os sistemas *Maglev* recebem a sua força de propulsão de um motor linear (ML), que é diferente, nos seus aspetos construtivos, de um motor convencional, pois não utiliza o acoplamento entre o rotor e o estator (Castro, 2012; Silva, 2012). Desta forma, o ML permite o deslocamento de uma carga ao longo de um percurso longitudinal, dispensando engrenagens (ver Figura 7). Em virtude de não existir o acoplamento mecânico para o movimento retilíneo, a estrutura torna-se mais simples e robusta, comparativamente aos motores convencionais.

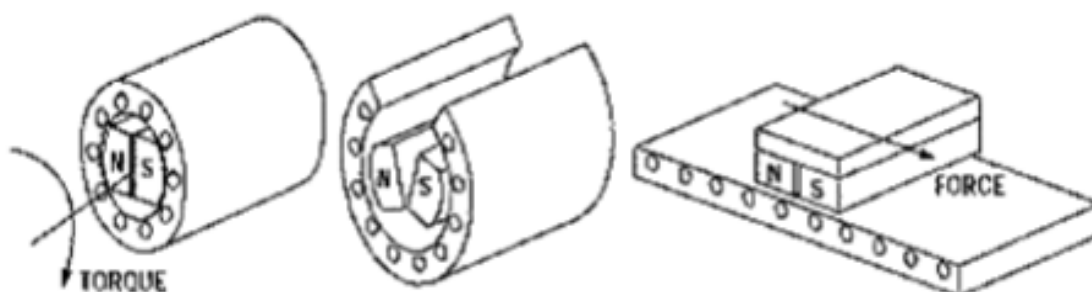


Figura 7 – Utilização de um ML de um motor rotativo (Fonte: (Lee et al., 2006))

Para a definição de um ML é necessário: 1) parte do motor que contém as bobinas das fases (primário); e 2) parte do motor composta por ferro laminado e barras curtas circuitadas entre si ou uma fonte de excitação magnética (secundário) – (Silva, 2012). Os ML dividem-se em duas principais configurações para a criação de movimento, ou impulsão, que são: os motores síncronos (MSL) e os motores de indução (MIL), que são abordados de seguida.

Motor síncrono linear (MSL)

O MSL não é dotado de torque de partida (Silva, 2012), o que significa que não arranca sozinho. Essa carência torna indispensável um sistema de excitação. Dentro das possíveis soluções para esta última necessidade, podem-se referir as seguintes quatro:

- 1) Íman permanente no indutor, em que se colocam os ímanes no interior do indutor ou na sua superfície, conforme apresentado na parte a) e b) da Figura 8, respetivamente. Se os ímanes se localizarem na superfície do indutor, este necessita de ser constituído de material ferromagnético, pois os ímanes são magnetizados na direção perpendicular ao induzido (Lee et al., 2006). Se os ímanes estiverem inseridos no indutor, estes serão magnetizados na direção do campo circulante e o indutor deverá ser constituído de material não ferromagnético, podendo ser o alumínio (Lee et al., 2006). Note-se que o MSL com ímanes permanentes deverá ter um enrolamento amortecedor. Para velocidades distintas da velocidade síncrona, uma corrente é induzida no enrolamento amortecedor que em conjunto com a ação do campo magnético do induzido permite a partida assíncrona. Este tipo de excitação utiliza o indutor fixo ao longo do percurso e considerando o elevado custo dos ímanes de terras raras, torna-se dispendioso este sistema de excitação para grandes percursos.

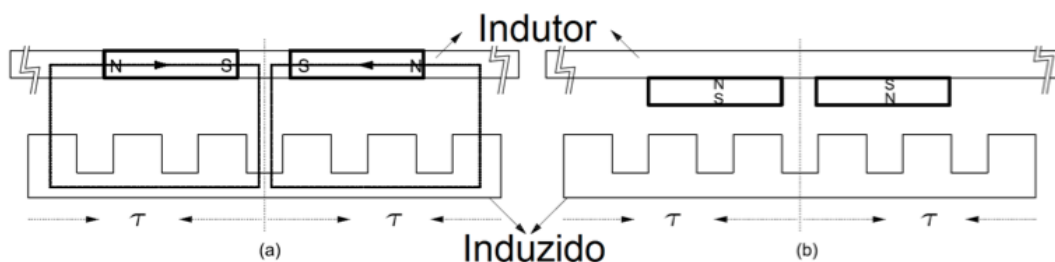


Figura 8 – Esquema de um íman permanente no indutor (Fonte: (Oliveira, 2013))

- 2) A colocação de um íman permanente no induzido: Este modo de excitação consiste em colocar os ímanes permanentes no induzido, considerando que este seja a parte móvel do motor (Lee et al., 2006). O campo magnético gerado pelos ímanes cria polos magnéticos no indutor, construído de material ferromagnético. A vantagem deste modo consiste em utilizar menos ímanes permanentes ou ainda substituí-los por eletroímãs.
- 3) Excitação Eletromagnética: Este sistema de excitação utiliza polos salientes e um enrolamento de excitação de campo (Lee et al., 2006). Se montado na parte móvel a corrente pode ser entregue utilizando escovas ou sistemas de transferência de energia por indução (ITP).
- 4) Excitação Supercondutora: Em motores síncronos lineares de potência elevada, os eletroímãs com núcleo ferromagnético podem ser substituídos por eletroímãs supercondutores (Lee et al., 2006). A densidade de fluxo magnético dos eletroímãs supercondutores é alta comparativamente à solução tradicional.

Motor de indução linear (MIL)

O MIL caracteriza-se por ser um motor de simples construção e robusto, idêntico a uma máquina rotativa. As bobinas de fase estão fixadas no primário e o secundário é constituído por um núcleo com ranhuras onde são inseridos condutores em forma de barras e curto-circuitados (Lee et al., 2006), formando um secundário tipo gaiola de esquilo (ver Figura 9). Ao contrário do MSL, que só produz torque à velocidade síncrona, o motor de indução não opera nesta condição, sendo por isso denominado assíncrono.

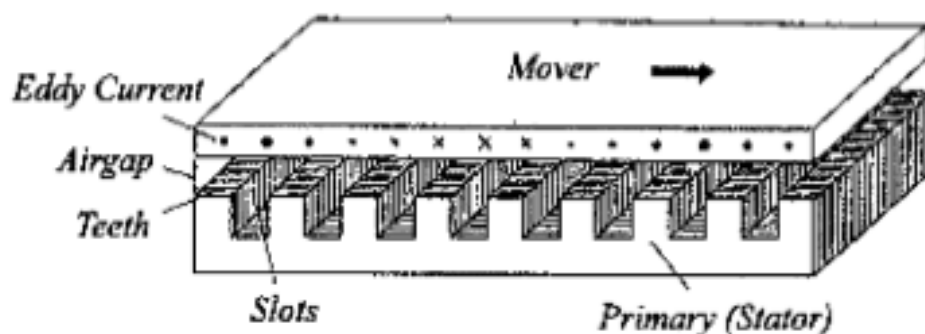


Figura 9 – Utilização de um MIL (Fonte: (Lee et al., 2006))

2.2.3. Direcionamento

Utilizando a força magnética de repulsão através da definição das bobinas de propulsão sobre os lados direito e esquerdo do *guideway* e ligando as bobinas, a força eletromotriz induzida (FEM) anula-se mutuamente quando o comboio circula no centro do trilho. No entanto, quando o comboio circula mais perto de uma das paredes laterais, as correntes fluem através das bobinas pela FEM induzida pela diferença de distância. Isso produz a força condutora.

Um exemplo de utilização deste tipo de direcionamento é o modelo japonês MLX, que ligando as bobinas de levitação correspondentes de ambas as paredes laterais, como mostrado na Figura 10, estas trabalham como um sistema de guia (com orientação). Quando um comboio se desloca lateralmente, as correntes que circulam entre as duas bobinas são induzidas e isso produz a força condutora (Lee et al., 2006). Já no caso do exemplo *Transrapid*, os eletroímãs laterais de orientação são ligados ao lado do veículo e a reação dos carris ocorre em ambos os lados do trilho. A interação entre eles mantém o veículo centrado lateralmente, como mostrado na Figura 11. A força de atração magnética é gerada de forma a reduzir a relutância e aumentar a indutância quando o veículo se desloca lateralmente. Porque a energia tende a fluir em direção a pequena relutância, esta guia o veículo centrado lateralmente. Quando a orientação é integrada com a levitação, a interferência existente entre estes processos faz com que seja difícil atingir altas velocidades (Lee et al., 2006). Portanto, a orientação que emprega as forças de atração é utilizada para operações de velocidades médias ou baixas, como é o caso do *HSST* ou *UTM*.

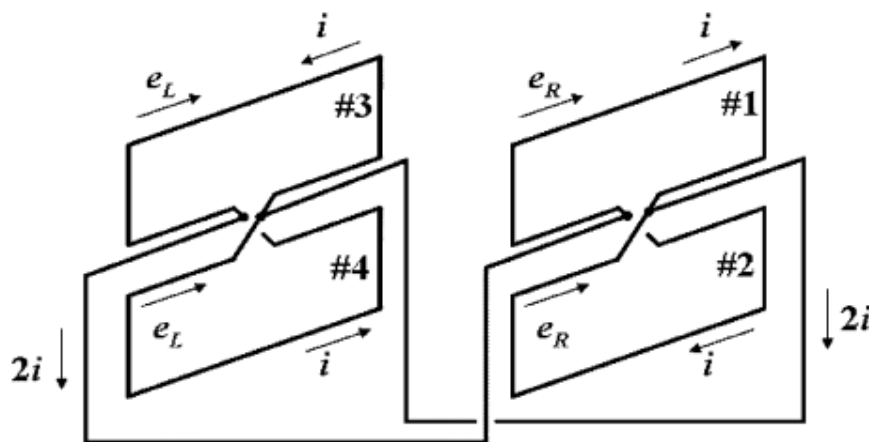


Figura 10 – Bobinas de levitação orientada utilizadas no modelo MLX (Fonte: (Lee et al., 2006))

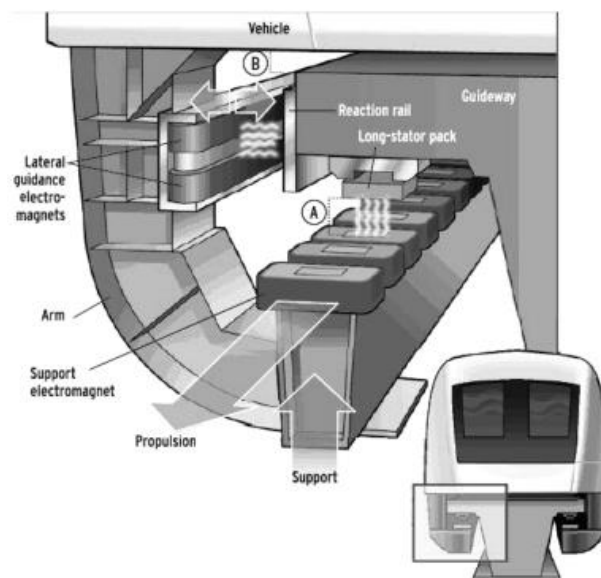


Figura 11 – Interação de forças entre veículo e *guideway* (Fonte: (Lee et al., 2006))

2.2.4. Transferência de Energia para o Veículo

Mesmo na eventualidade de todos os comboios *Maglev* terem baterias no seu interior, o fornecimento de energia elétrica, do lado da terra, é necessário para abastecer o sistema de levitação, propulsão, equipamentos elétricos e carregar baterias. A transferência de energia ao longo de todo o *guideway* envolve o uso de um gerador linear ou um contacto mecânico baseado na velocidade de operação (Lee et al., 2006). Esta última pode ser classificada como: (1) operação de velocidade média-baixa, até 100 Km/h, onde o comboio *Maglev* utiliza geralmente um contato mecânico, como um pantógrafo; e (2) operação de velocidade alta, onde o comboio *Maglev* não consegue obter energia do solo usando um contato mecânico. Por esta última razão, os comboios *Maglev* de alta velocidade usam sua própria forma de entregar o poder ao veículo a partir do solo. O comboio *Transrapid* alemão emprega o uso de um gerador linear, que está integrado nos eletroímãs de levitação.

O gerador linear conduz a potência a partir do campo eletromagnético viajante, quando o veículo está em movimento. A frequência dos enrolamentos do gerador é seis vezes maior do que a frequência do motor síncrono (Lee et al., 2006). O gerador linear não tem contato mecânico, o que é um aspeto muito positivo para operações de alta velocidade. No entanto, a flutuação da tensão induzida devido à irregularidade do entreferro, e de pequena magnitude da tensão induzida por causa das bobinas indutoras, pode ser um problema.

2.3. Evolução dos Sistemas *Maglev*

Em 1842, Samuel Earnshaw, cientista e homem da igreja inglês, defendia que a levitação estável sem contacto, através apenas de forças provenientes de ímanes permanentes era impossível (Silva, 2012). Todavia, em março de 1912, os cientistas Robert Goddard e Emile Bachelet realizaram uma demonstração pública, em Nova Iorque, de um modelo patenteado de um comboio sem atrito (Yaghoubi, 2013). Mais tarde em 1934, o alemão *Hermann Kemper* patenteou o comboio *Maglev*. Desde então, durante as últimas décadas o desenvolvimento do comboio *Maglev* passou por um período acelerado de estudo e aprofundamento de conceitos nos anos sessenta. A maturidade do seu desenvolvimento ocorreu nas décadas de setenta e oitenta, e o período de teste nos anos 1990, sendo realizado o primeiro serviço público, finalmente, em 2003, em Shanghai - China (Eastham & Hayes, 1988; Sinha, 1984).

À medida que a tecnologia *Maglev* começou a ser discutida como uma solução muito promissora para o futuro próximo, muitos investigadores desenvolveram tecnologias focadas na análise de motores lineares, supercondutividade, ímanes permanentes, entre outros aspetos construtivos e tecnológicos relevantes para o desenvolvimento da tecnologia (Abel, Mahtani, & Rhodes, 1978; Cho, Kato, & Spilman, 1993; Fujie, 1999; Lee et al., 2006).

Os primeiros estudos e desenvolvimentos da tecnologia *Maglev* ocorreram na década de sessenta na Alemanha e no Japão. Atualmente já se atingiram níveis industriais, com a construção de alguns troços, encontrando-se vários protótipos atualmente em construção. Nos anos 90, o sistema *Inductrack*, o *Swissmetro* e o *UTM*, desenvolvido pelos Estados Unidos da América, pela Suíça e pela Coreia do Sul, respetivamente, foram intensamente estudados e alguns protótipos construídos.

O *Transrapid* em Shanghai (China) e o *HSST* em Nagoia (Japão) tornaram-se serviços de transporte públicos desde dezembro de 2003 e março de 2005, respetivamente. Alguns outros projetos, desenvolvidos nos EUA, Coreia do Sul e Japão, estão atualmente a aguardar aprovação.

A Figura 12 esquematiza a perspectiva histórica do desenvolvimento dos sistemas de transportes de passageiros, ajudando a compreender, ao longo das últimas décadas, a evolução e o desenvolvimento desde a criação do conceito até aos dias atuais.

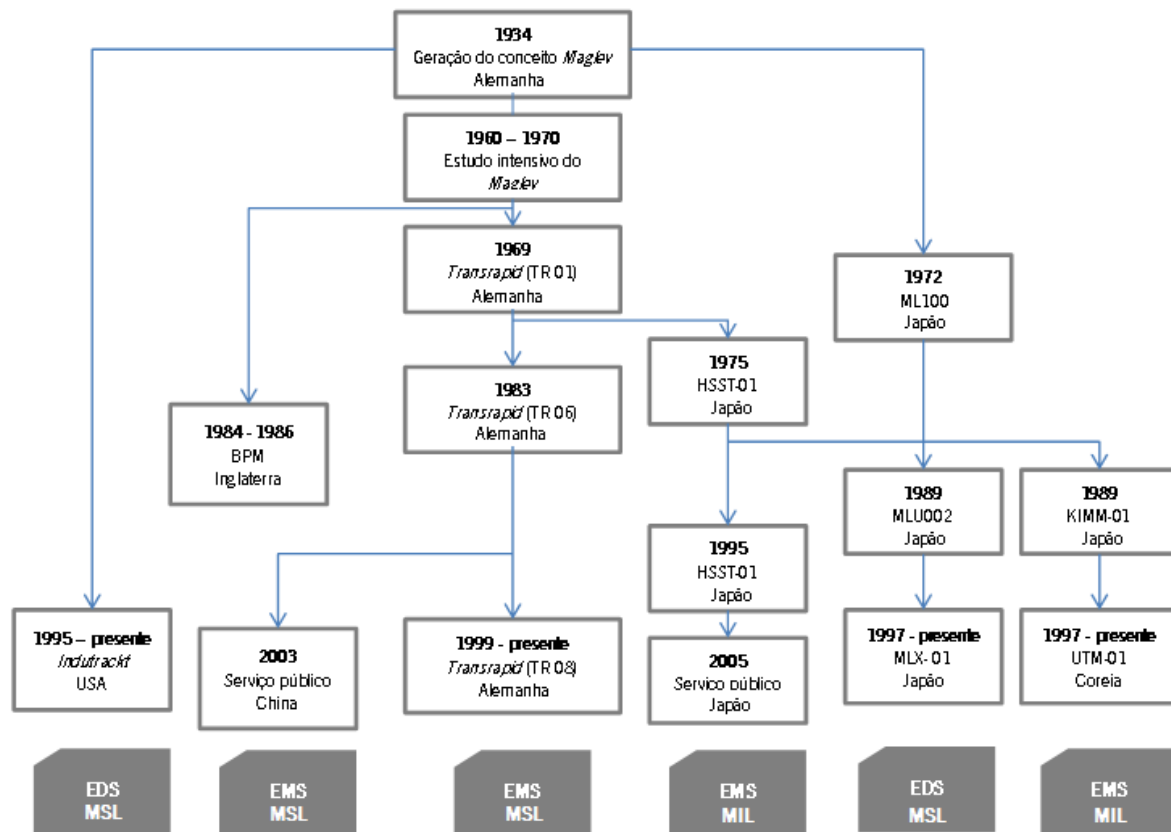


Figura 12 - Diagrama do desenvolvimento dos sistemas de transportes de passageiros *Maglev* (Adaptado de: (Lee et al., 2006))

2.4. Análise dos Principais Exemplos de Sistemas *Maglev*

De seguida, são apresentados alguns exemplos dos principais sistemas *Maglev* existentes e amplamente referenciados na literatura.

2.4.1. Sistema HSST

Inserido neste tipo de sistemas, e olhando ao diagrama da Figura 12, destaca-se como principal desenvolvimento do eixo HSST (*High Speed Surface Transport*), o *Linimo* (ver Figura 13). Este é levitado através de forças atrativas – sistema EMS, e tem como sistema de propulsão um motor de indução linear (MIL). Este sistema japonês é um sistema de transporte de baixo custo e de baixa velocidade (aproximadamente 100 km/h), e não necessita de sistemas adicionais para controlar a direção do comboio (Silva, 2012).



Figura 13 – Exemplo do sistema de transporte urbano – o Linimo HSST (Fonte: (Harding, 2004))

O sistema de transporte urbano *Linimo* foi projetado pelo Centro de Desenvolvimento de Chubu HSST, e foi inaugurado em 2005 na Nagoia (Kubota, Yasuda, Fujino, & Ishimoto, 2005). Atualmente este sistema funciona como uma linha local de utilização frequente. Sendo considerado como o primeiro sistema comercial urbano de passageiros, este sistema atinge apenas uma velocidade máxima de 100 km/h, e a suspensão alcançada, em movimento, é de oito milímetros acima da pista (Kubota et al., 2005; Morita & Nagano, 2009). Este sistema funciona como uma alternativa aos sistemas convencionais, e não foi projetado para altas velocidades, mas sim para transportes frequentes dentro de localidades. A linha de Nagoia tem 8,9 km (quilômetros) de distância com um raio de curvatura de 75 metros e uma inclinação máxima de 6% (Morita & Nagano, 2009).

Algumas vantagens e desvantagens têm sido atribuídas ao sistema HSST. Um dos aspectos mais apelativos deste sistema é quase inexistência de ruído, durante a sua operação (Harding, 2004). Os principais problemas apontados são relativos à sua capacidade, quando em 2005 o número de passageiros excedeu o seu limite máximo e este foi incapaz de levantar (Morita & Nagano, 2009). De referir ainda que, nos dias em que a velocidade do vento ultrapassa os 25 m/s, que é relativamente comum nesta localidade, o sistema não pode operar.

A Figura 14 apresenta os principais eventos históricos relacionados com o sistema HSST.

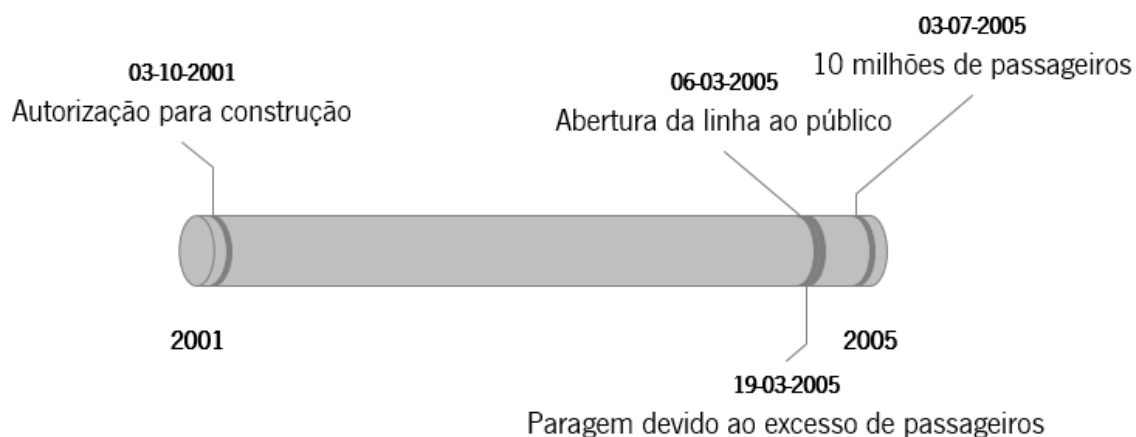


Figura 14 – Principais eventos históricos relacionados com o sistema HSST

2.4.2. Sistema *Transrapid*

Não existe nenhum sistema de transporte terrestre de alta velocidade mais rápido do que o *Transrapid* (Lee et al., 2006; ThyssenKrupp, 2008). Este sistema de transporte proporciona um elevado grau de segurança e de conforto para os seus passageiros. Além disso, é amigo do ambiente. Esta tecnologia apresenta-se como económica, pois está livre do desgaste dos componentes mecânicos e consome uma quantidade relativamente pequena de energia (ThyssenKrupp, 2008). Por essas razões, as despesas operacionais são tipicamente mais baixas do que as dos sistemas ferroviários tradicionais (Cassat & Jufer, 2002; ThyssenKrupp, 2008).

O custo de investimento para a totalidade do sistema de levitação magnética (o trilho, a frota de veículos, e o material de suporte) é semelhante ao investimento em transportes ferroviários modernos de alta velocidade. Como o trilho de suporte pode ser adaptado de forma flexível sobre a paisagem, uma comparação entre custos de investimento para o trilho (*guideway*) é mais favorável

para o *Transrapid*. A falta de contato entre o veículo e a sua guia provoca pouco desgaste em todos os componentes o que faz com que esta tecnologia seja mais económica em custos de manutenção. O consumo de energia também é inferior e a operação altamente automática, o que resulta numa despesa operacional que representa cerca de metade das outras soluções ferroviárias (Cassat & Jufer, 2002).

Em questões de segurança, o facto de o veículo envolver o trilho, elimina, praticamente, a possibilidade deste descarrilar. O sistema de propulsão no trilho exclui também a possibilidade de haver colisões com outros veículos *Transrapid*.

Em caso de um mau funcionamento de um dos componentes de propulsão e de controlo, os restantes componentes podem assumir as suas responsabilidades, assegurando assim uma alta disponibilidade geral do sistema. Se um grupo de componentes eletrónicos no veículo falhar, o conceito de alta redundância garante que o veículo irá atingir o próximo destino.

Em relação ao trilho, este é inspecionado e monitorizado por veículos especiais de manutenção do trilho. Estes são fornecidos com sistemas de medição para detetar qualquer alteração na posição do equipamento (estator, enrolamentos de cabo, mecanismos de orientação) e dispõe de sistemas óticos de interpretação digital, capazes de verificar o estado das superfícies, por exemplo, a corrosão. Além disso, a análise dos dados obtidas pelo sensor permite uma manutenção diária na deteção de qualquer alteração na posição da guia e aplicar medidas corretivas de uma forma eficiente e em tempo útil.

Sublinhe-se que não é necessário um acesso especial ao longo do trilho para fins de manutenção.

Em longas distâncias, até cerca de 800 km, a viagem no *Transrapid* não demora mais do que num avião (incluindo o tempo de deslocação para o aeroporto, bem como *check-in*). Com velocidades que atingem os 500 km/h, este sistema ferroviário é também mais rápido do que qualquer outro meio de transporte terrestres (Cassat & Jufer, 2002).

Uma das grandes vantagens destes sistemas é também a boa aceleração que estes dispõem, fazendo desta forma com que as curtas distâncias entre estações aumentam o tempo de viagem ligeiramente e, desta forma, permitindo o aumento de estações entre cidades. Isto torna o sistema mais flexível do que qualquer outro. Refira-se ainda que o *Transrapid* é também adequado para distâncias curtas (Cassat & Jufer, 2002).

Controlados eletronicamente, os ímanes de suporte encontram-se localizados em ambos os lados ao longo de todo o comprimento do veículo, de forma a atrair o veículo para os componentes ferromagnéticos montados no estator, no lado de baixo do trilho.

Os ímanes de orientação encontram-se localizados em ambos os lados ao longo de todo o comprimento do veículo, de forma a manter o veículo lateralmente equilibrado sobre a pista. Os sistemas eletrónicos garantem que a folga permanece constante (nominalmente 10 mm). Para entrar em operação, o *Transrapid* necessita de menos energia do que o seu equipamento de ar condicionado.

A energia necessária para operar o sistema de levitação é fornecida a partir de baterias de bordo e, assim, independente do sistema de propulsão. O veículo é capaz de se suspender até uma hora sem energia externa. Durante a viagem, as baterias de bordo são recarregadas por geradores lineares integrados nos ímanes de suporte (ver Figura 15).

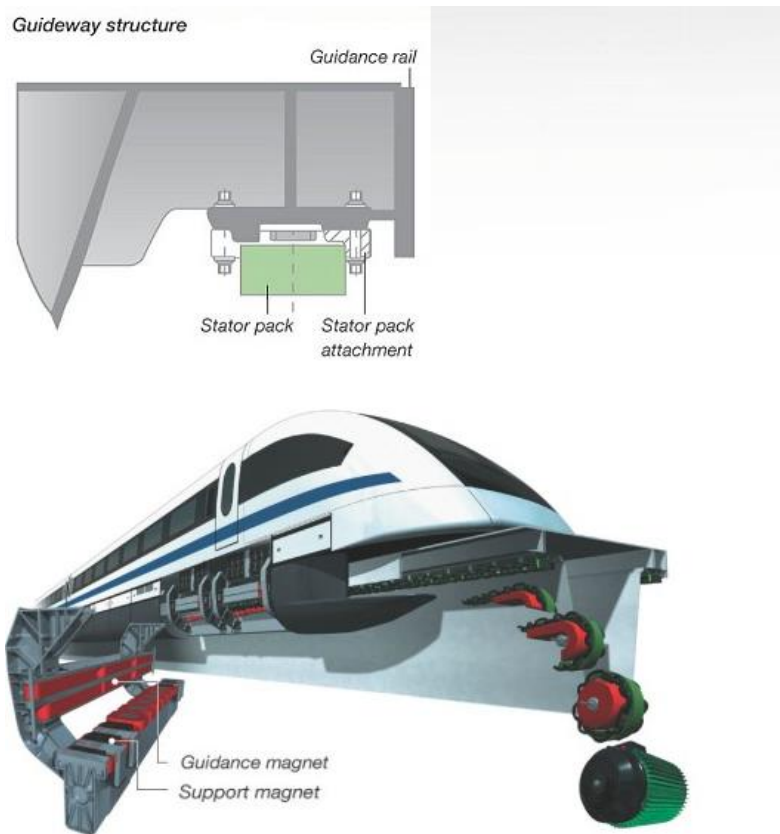


Figura 15 – Estrutura do *guideway* do sistema *Transrapid* (Fonte: (ThyssenKrupp, 2008))

Os veículos *Transrapid* compreendem um mínimo de duas secções, cada uma com aproximadamente 90 lugares. De acordo com a aplicação e volume de tráfego, estes veículos podem ser compostos até dez secções (duas finais e oito secções intermédias). No entanto, no *Transrapid* o transporte de carga de alta velocidade pode ocorrer, pois podem conter secções especiais de carga que podem ser combinadas com as secções de passageiros ou montados para formar trens de carga dedicados (carga de até 15 toneladas por secção). Refira-se que nem o comprimento do veículo nem da carga afeta o poder de aceleração.

Relativamente ao Sistema de Propulsão, o sistema *Maglev Transrapid* está dotado de um motor síncrono linear, que é utilizado tanto para propulsão como para travagem. Ele funciona como um motor elétrico rotativo cujo estator é cortado e estendido ao longo sob o trilho. No interior dos enrolamentos do motor, a corrente alternada gera um campo magnético que se desloca viajando pelo veículo e sem estabelecer contacto. Os ímanes de apoio, em função do veículo são excitados como um rotor. O sistema de propulsão no trilho é apenas ativado na secção em que o veículo está em operação.

A velocidade pode ser continuamente regulada por variação da frequência da corrente alternada. Se o sentido do campo viajante se inverter, o motor torna-se um gerador que funciona como freio. A energia de frenagem pode ser utilizada, para a alimentação da rede elétrica.

O sistema de controlo (ver Figura 16) de operação controla a operação de funcionamento e garante a segurança do sistema *Transrapid*. Ele protege os movimentos do veículo, a posição dos interruptores, e todas as outras funções de segurança e operacionais. Um sistema de transmissão rádio é utilizado para a comunicação entre o centro de controlo central e os veículos.

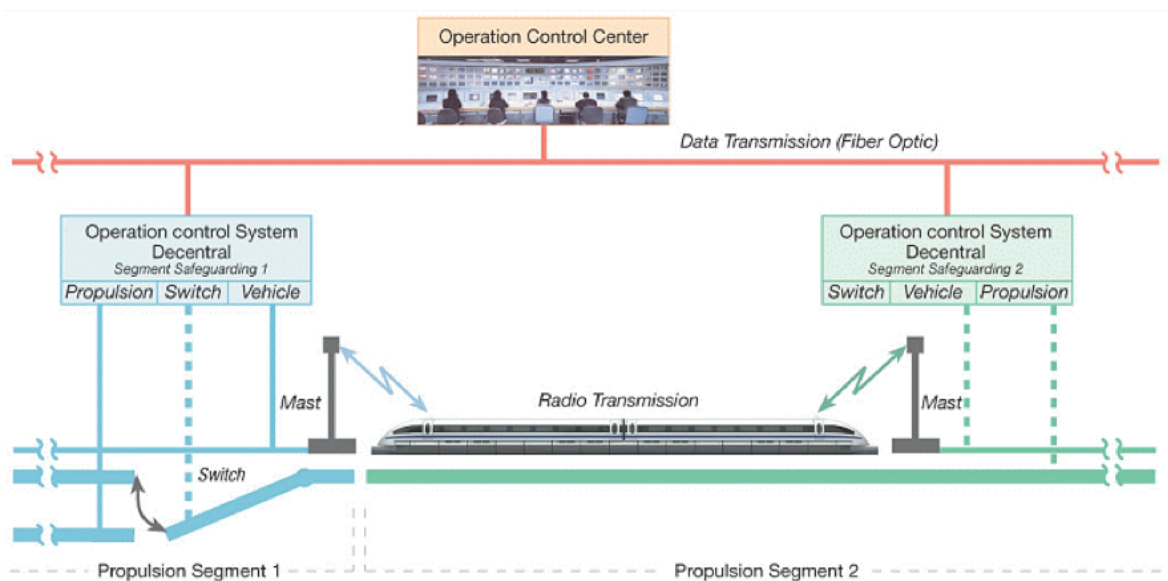


Figura 16 – Funcionamento do centro de controlo do sistema *Transrapid* (Fonte: (ThyssenKrupp, 2008))

A estrutura de guia (*guideway*) tanto pode ser construída ao nível do solo bem como numa estrutura elevada, como se pode verificar na Figura 17. As colunas devem ser constituídas de aço as vigas deverão ser de betão, até 62 metros de comprimento.

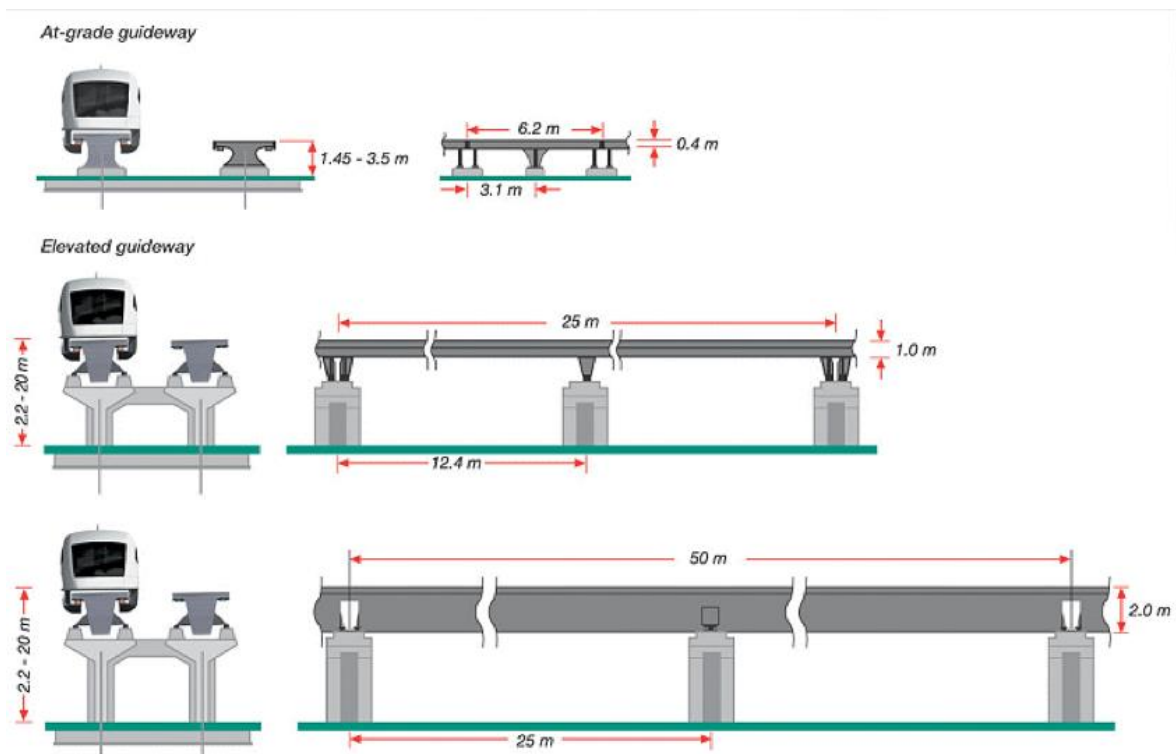


Figura 17 – Características da *guideway* do sistema *Transrapid* (Fonte: (ThyssenKrupp, 2008))

2.4.3. Sistema *SCMaglev* (*MLX01*)

O *SCMaglev* (Supercondutor *Maglev*) é um comboio de levitação magnética do sistema desenvolvido pela *Central Japan Railway Company* (Central JR) e do Instituto de Pesquisa Técnica Ferroviária (associação de grupo *Japan Railways*). O sistema foi anteriormente referida como "EME", depois de os nomes de vários veículos de teste e por ter uma faixa de levitação magnética em forma de U. O MLX01 (onde X significa experimental) é um dos mais recentes modelos de uma série de comboios *Maglev* em desenvolvimento no Japão desde 1970. Em dezembro de 2003, um comboio de três carros atingiu uma velocidade máxima de 581 km/h (361 mph) (recorde mundial de velocidade para veículos ferroviários), em uma corrida veículo tripulado (The International Maglevboard, n.d.-b).

O sistema *SCMaglev* usa uma suspensão eletrodinâmico do sistema (EDS). Instalado em *bogies* dos comboios são supercondutores em ímanes, e os guias contêm dois conjuntos de bobinas de metal. O atual sistema de levitação utiliza uma série de bobinas enroladas em "figura de oito" ao longo de ambas as paredes do trilho (ver Figura 18). Estas bobinas estão também em ligação cruzada por baixo da faixa (Post & Ryutov, 2000).

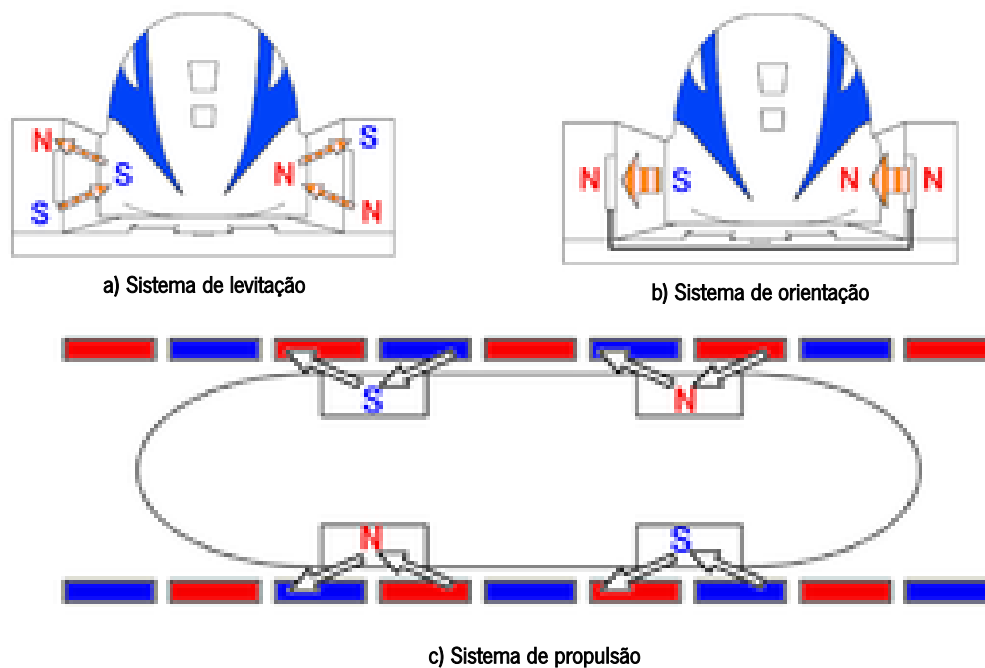


Figura 18 – Exemplo do Sistema *Maglev* MLX (Fonte: (MaglevProject, 2008))

Quando o comboio acelera, os campos magnéticos de seus ímãs supercondutores induzir uma corrente para essas bobinas, devido ao efeito de indução do campo magnético. Se o comboio for centrado com as bobinas, o potencial elétrico seria equilibrado e não há correntes seria induzida. No entanto, como o comboio circula sobre rodas de borracha a velocidades relativamente baixas, os campos magnéticos são posicionados abaixo do centro das bobinas, fazendo com que o potencial elétrico para deixar de ser equilibradas. Isto cria um campo magnético opondo reativo polo do ímã supercondutor (em conformidade com a lei de *Lenz*), e um poste de cima que atrai. Quando o comboio chega a 150 km/h (93 mph), não existe fluxo de corrente suficiente para levantar o comboio de 100 mm (4 polegadas) acima do trilho (Post & Ryutov, 2000).

Estas bobinas geram também orientar e estabilizar as forças. Porque eles estão em ligação cruzada por baixo do trilho de suporte, se o comboio se move fora do centro, são induzidas correntes nas ligações que corrigem o seu posicionamento (Post & Ryutov, 2000). O *SCMaglev* também utiliza um motor linear síncrono sistema de propulsão (LSM), que alimenta um segundo conjunto de bobinas no trilho.

2.4.4. Sistema *Inductrack*

O *Inductrack*, sistema desenvolvido nos EUA, é um sistema de EDS que utiliza matrizes *Halbach* de ímãs permanentes (PM), ao invés de ímãs supercondutores, para a levitação e para a propulsão (U.S. Department of Energy, 2012), tal como é possível visualizar na Figura 6 a). O nome deste sistema advém da utilização de uma pista (*track*) formada por circuitos indutivos. Existem autores (Silva, 2012), que defendem e definem que estes sistemas são um modelo alternativo ao EMS e EDS, porém, nesta dissertação, defende-se que este modelo encontra-se inserido nos sistemas EDS, em virtude de o modo de suspensão utilizar forças repulsivas.

Uma das vantagens associadas a este sistema está relacionada com a melhoria na eficiência energética e na estabilidade face aos sistemas baseados em *Maglev* convencionais (U.S. Department of Energy, 2012). Além disso, em ambientes urbanos, este sistema tem vantagens adicionais sobre os sistemas de transporte e trânsito em massa convencionais, incluindo: menor ruído, maior qualidade e maior capacidade. O esforço para a manutenção deste sistema é também menor, comparativamente a outros sistemas de levitação magnética (U.S. Department of Energy, 2012). A probabilidade de interrupção de energia nestes sistemas é também menor (U.S. Department of Energy, 2012), uma vez que a levitação ocorre independentemente de qualquer fonte de energia, em contraste com as necessidades de energia de sistemas como o *Transrapid*.

O sistema *Inductrack* tem diversas aplicações, podendo ser aplicado em redes de alta velocidade (interurbano) e de baixa velocidade (urbana).

Em síntese, existem diversos exemplos de projetos *Maglev* que podem atualmente ser apontados, alguns dos quais foram identificados e caracterizados nesta secção. Contudo, outros poderiam ser aprofundados, como é o caso: do *Swissmetro* da Suíça; do UTM da Coreia do Sul; do *Maglev-2000*; e do *Urban Maglev* dos EUA.

2.4.5. Análise Comparativa dos Tipos de Sistemas *Maglev*

Com base nas secções anteriores deste capítulo, é possível verificar que, de uma série de problemas práticos relacionados com os sistemas *Maglev*, o mais recorrentemente referenciado é o custo. Esta desvantagem é comum a todos os tipos de sistema *Maglev*. A Europa e o Japão possuem já uma vasta rede de alta velocidade ferroviária, o que é um entrave à mudança para a tecnologia *Maglev*, dado que os custos de infraestrutura seriam significativos. Em teoria, os EUA estão numa posição mais favorável para investir em novas tecnologias de transporte em virtude de sua relativa falta de comboios de alta velocidade eficaz e sistemas de transporte em massa. Ainda assim, os EUA têm um histórico reduzido na aplicação desta tecnologia (The International Maglevboard, 2005).

No âmbito deste tópico, a análise de vantagens e desvantagens da tecnologia *Maglev* é realizada em duas perspetivas: a) comparação entre os sistemas de transporte *Maglev* e os sistemas tradicionais roda-carril, e (b) comparação entre os diversos tipos de *Maglev*.

2.4.6. Comparação entre Sistemas *Maglev* e Sistemas Tradicionais Roda-Carril

Em relação às vantagens existentes entre um sistema *Maglev* e um sistema convencional roda-carril, podem se aferir algumas vantagens que se passam a enumerar nos próximos parágrafos.

Os custos de manutenção são inferiores nos sistemas *Maglev* devido à ausência de rodas, o que tem como consequência direta a redução dos custos de manutenção, em virtude de não haver desgaste originado pelo contacto entre partes mecânicas. Este motivo oferece ainda uma grande redução do ruído e vibração, uma das principais preocupações para as pessoas que vivem perto das infraestruturas de transporte.

A ausência de contacto previne o escorregamento e o deslizamento entre a roda e o carril, o que possibilita acelerações e desacelerações mais rápidas, linhas com maiores inclinações, para além de ser menos suscetível às condições atmosféricas.

Por último, apesar da sua dependência da estrutura do veículo (articulações), o raio mínimo de curvatura é inferior, o que facilita o acompanhamento das vias existentes, inserindo-se de forma mais integrada no ambiente.

A Tabela 3 resume esta análise comparativa.

Tabela 3 – Comparação das características dos sistemas *Maglev* e dos sistemas roda-carril tradicionais

| Característica | Sistema <i>Maglev</i> | Sistema Roda-Carril |
|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ruído e Vibração | <ul style="list-style-type: none"> • Não existe contacto • Ruído: 60-65 [dB] | <ul style="list-style-type: none"> • Existe contacto entre roda e carril • Ruído: 75-80 [dB] |
| Segurança | Não há possibilidade de descarrilhamento | Descarrilhamento ao mínimo defeito |
| Estrutura de guia (<i>guideway</i>) | Veículo leve com carga distribuída → estrutura leve | Veículo pesado com carga concentrada → estrutura pesada |
| Manutenção | Muito reduzida | Troca periódica de rodas, travões e carris |
| Grau | 80~100/1000 | 30~50/1000 |
| Curva | 30 [m] em radianos | 150 [m] em radianos |

2.4.7. Comparação entre os Diversos Exemplos de Comboios *Maglev*

No âmbito da levitação magnética em comboios de transporte de passageiros, apresentam-se de seguida uma comparação entre os principais exemplos já caracterizados (ver secção “Análise dos Principais Exemplos de Sistemas *Maglev* Análise dos Principais Exemplos de Sistemas *Maglev*”).

Note-se que o sistema mais económico a ser implementado é o *Inductrack*, pois utiliza apenas ímanes permanentes (PM). O sistema MLX-01 utiliza bobinas supercondutoras que necessitam de um arrefecimento constante, e os sistemas *Transrapid* e HSST necessitam de eletroímãs potentes para que sejam capazes de levitar.

Alguns destes projetos de sistemas *Maglev* encontram-se ainda em investigação, enquanto outros já estão preparados para serem instalados em ambiente real (Sinha, Zhou, & Kutiyal, 1993). Apesar de todos os sistemas referidos anteriormente servirem para o mesmo propósito, existem uma considerável diferença entre estes relativamente:

- **Construção:** o método mais económico é o sistema *Inductrack*, que utiliza apenas ímanes permanentes, enquanto o sistema MLX utiliza bobinas supercondutoras que necessitam de um arrefecimento constante a baixa temperatura aumentando a complexidade e o custo da sua construção, e os sistemas *Transrapid* e HSST necessitam de eletroímãs potentes, além de circuitos complicados;
- **Velocidade, conforto e estabilidade:** o sistema que proporciona todos estes requisitos da melhor forma é o sistema MLX;
- **Protótipos:** existem protótipos em escala real de apenas dois sistemas, o HSST e

o *Transrapid*, que já se encontram em funcionamento para transporte de passageiros. Os sistemas *Inductrack* e o MLX existem apenas em protótipos de laboratório, visto tratar-se ainda de uma tecnologia recente.

A Tabela 4 resume esta análise comparativa, identificando a tipologia e as características dos comboios *Maglev* em operação e também daqueles que estão prontos a serem utilizados.

Tabela 4 – Comparação das características dos exemplos sistemas *Maglev*

| Tipo | Características | | | | | | Estado |
|------------------------------|-----------------|-----------------------------------------------------------------------|------------|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|--------|
| Sistema | Suspensão | Propulsão | Gap | Velocidade máxima | Tipo de serviço | Outras Características | |
| HSST (Japão) | EMS | SP-MIL | 8-12[mm] | 100 [km/h] | <ul style="list-style-type: none"> • Pequeno percurso • Pequena/média velocidade • Nagoia, Japão | Levitação e orientação integrados | Op |
| <i>Transrapid</i> (Alemanha) | EMS | LP-MSL | 8-12[mm] | 500 [km/h] | <ul style="list-style-type: none"> • Grande Percurso • Alta velocidade • Shanghai, China | Levitação e orientação separados | |
| MLU, MLX (Japão) | EDS | LP-MSL | 80-50[mm] | 581 [km/h] | <ul style="list-style-type: none"> • Grande percurso • Alta velocidade | Arrefecimento para os supercondutores | |
| UTM (Coreia) | EMS | SP-MIL | 8-12[mm] | 110 [km/h] | <ul style="list-style-type: none"> • Pequeno percurso • Pequena/média velocidade | Levitação e orientação integrados | P |
| <i>Swissmetro</i> (Suíça) | EMS | <ul style="list-style-type: none"> • LP • MSL | 18-22[mm] | 500 [km/h] | <ul style="list-style-type: none"> • Grande percurso • Alta velocidade | Vácuo parcial no túnel | |
| <i>Inductrack</i> (USA) | PM EMS | LP-MSL | 80-150[mm] | 500 [km/h] | <ul style="list-style-type: none"> • Médio percurso • ≠ velocidades tangíveis | Sistema passivo | |

Legenda: (Op) Em operação | (P) Prontos a serem utilizados

2.5. Síntese do Capítulo

Maglev é um fenómeno físico através do qual é possível suspender um objeto com suporte a apenas um campo magnético. Das diferentes arquiteturas dos sistemas *Maglev*, destacam-se: 1) suspensão, 2) propulsão, 3) direcionamento, e 4) transferência de energia para o veículo.

O modo de suspensão pode-se dividir em: EMS e EDS. Enquanto os sistemas EMS empregam forças atrativas para alcançar a levitação, os sistemas EDS realizam-na através de forças repulsivas. Uma das vantagens dos sistemas EMS face aos EDS é a existência de campos magnéticos inferiores. Todavia, nos EMS podem ocorrer problemas de vibração.

No modo de propulsão, os sistemas *Maglev* recebem a sua força de propulsão de um ML, que permite o deslocamento da carga ao longo de um percurso longitudinal, dispensando engrenagens.

Este modo pode dividir-se em: MSL e MIL.

No modo de direcionamento, a força eletromotriz induzida – FEM – anula-se mutuamente quando o comboio circula no centro do trilho. Quando se afasta deste centro, são utilizadas as correntes que circulam entre duas bobinas de propulsão para produzir uma força condutora.

O modo transferência de energia para o veículo envolve a transferência de energia ao longo do *guideway*, com recurso a um gerador linear ou um contacto mecânico.

Na perspetiva histórica, identificou-se que a origem do conceito *Maglev* está datada de 1912. A maturidade do seu desenvolvimento ocorreu sobretudo nas décadas de setenta e oitenta, e o período de teste nos anos 90.

Dos diversos exemplos de comboios *Maglev* de transporte de passageiros – abordagem mais recorrente na literatura, e predominante neste capítulo –, são destacados os seguintes: o HSST (Japão); o *Transrapid* (Alemanha); o *SCMaglev* MLX01 (Japão); e o *Inductrack* (USA).

O sistema HSST é do tipo EMS, e tem como sistema de propulsão um MIL. Este sistema é considerado um sistema de transporte de baixo custo e de baixa velocidade. O sistema *Transrapid* é do tipo EMS, e é considerado o mais rápido destes sistemas. Também é visto como seguro e económico. Todavia, é composto por circuitos complexos. O sistema *SCMaglev* MLX01 é do tipo EDS. Este sistema necessita de arrefecimento constante, o que aumenta a sua complexidade e o seu custo. Todavia, na perspetiva “velocidade, conforto e estabilidade” é considerado o mais adequado face aos restantes. O sistema *Inductrack* utiliza matrizes *Halbach* de PM para a levitação e para a propulsão. Uma das suas principais vantagens é a melhoria na eficiência energética, face a sistemas convencionais. Contudo, pode ter problemas relacionados com a instabilidade levitação.

Além disso, são também identificadas vantagens e desvantagens dos sistemas *Maglev* face aos sistemas roda-carril. Destas vantagens destacam-se: (1) redução do ruído; (2) maior segurança em situações de descarrilhamento; e (3) necessidade de manutenção reduzida. Contudo, e ainda assim, o investimento inicial tende a ser significativamente superior, bem como a substituição das infraestruturas atuais (maioritariamente direcionadas para sistema roda-carril) têm um custo e tempos de substituição significativos.

(ESTA PÁGINA FOI INTENSIONALMENTE DEIXADA EM BRANCO)

Capítulo 3. Fundamentos Teóricos

Para a compreensão da tecnologia *Maglev*, é essencial o entendimento de alguns fenômenos físicos, nomeadamente: magnetismo e leis associadas. Também é necessário apresentar os elementos/componentes eletromecânicos capazes/necessários para a realização deste fenômeno de levitação. Estes fundamentos teóricos são apresentados neste capítulo, por serem considerados elementos essenciais para o entendimento da tecnologia *Maglev*.

3.1. Conceitos Base: Magnetismo, Eletromagnetismo e Supercondutividade

Os três conceitos – magnetismo, eletromagnetismo e supercondutividade – considerados fundamentais para a compreensão do fenômeno *Maglev* são de seguida apresentados.

3.1.1. Magnetismo

Existem determinadas minas que fornecem uma substância denominada íman natural, ou pedra-íman, que possui a propriedade de atrair materiais ferrosos (Rodrigues, 1987), como por exemplo: o aço e o ferro. Este minério de ferro designa-se magnetite. Segundo uma lenda, narrada pelo naturalista Plínio, esta pedra que já é conhecida desde a remota antiguidade, teria sido descoberta pelo pastor Magnes, quando este observou que as tachas das botas e a ponta da ferrada do seu cajado eram fortemente atraídas para o solo (Rodrigues, 1987). Por existir em Magnésia, cidade da Ásia menor, os antigos designavam-na pelos nomes de pedra de Magnésia ou magnete, nome pelo qual é conhecida.

O magnetismo é o nome dado ao fenómeno físico que caracteriza a propriedade dos corpos atraírem outros materiais, tais como: ferro, aço, níquel, cobalto, crómio, e outras ligas especiais (Rodrigues, 1987). A estes elementos, que possuem estas propriedades magnéticas, independentemente de qualquer ação, dá-se o nome de ímanes naturais (Rodrigues, 1987). É importante referir que estas propriedades podem também ser transmitidas a alguns corpos, como por exemplo o aço, em que estes podem adquirir as mesmas propriedades magnéticas de um íman natural, passando a designar-se um íman artificial. Designam-se como ferromagnéticos estes corpos que têm a capacidade de se magnetizarem (Rodrigues, 1987). Note-se que a capacidade de atração de outros corpos ferromagnéticos não se encontra uniformemente repartida em toda a extensão do mesmo.

Uma das particularidades, e vantagens, dos ímanes artificiais é a possibilidade de estes poderem ter diferentes formas, consoante a utilização a que se destinam: desde barras retilíneas com várias secções, barras recurvadas em forma de “U” (ferradura), e agulhas magnéticas, que são lâminas alongadas e em forma de losango.

A força de atração encontra-se nas extremidades, às quais se dá o nome de polos magnéticos. Na parte intermédia do íman não se faz sentir atuação, e designa-se zona neutra (Rodrigues, 1987). Relativamente aos polos, estes são designados como polo norte e polo sul, consoante a direção das linhas de força (ver Figura 19).

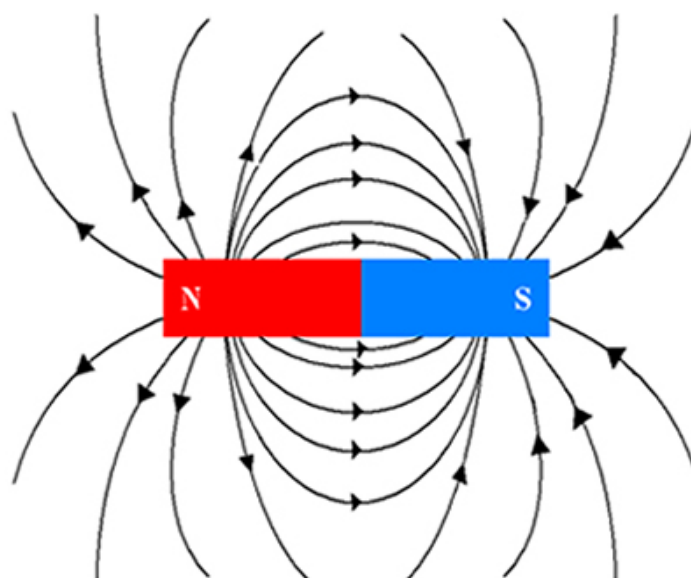


Figura 19 – Linhas de força (Fonte: (Silva, 2012))

Os ímanes têm polos, que apresentam linhas de força com direção opostas, e cujas relações entre estas vão definir se se está na presença de um processo atrativo ou repulsivo. Sabe-se que, entre dois ímanes, polos iguais repelem-se, e polos opostos atraem-se (Rodrigues, 1987), tal como esquematizado na Figura 20. No polo norte, ao se aproximar um íman de uma agulha magnética, verifica-se que o íman atrai o polo sul da agulha e repele o polo norte desta; no polo sul, o íman atrai o polo norte da agulha e repele o polo sul (ver Figura 20). O que se conclui que: a) polos iguais repelem-se, e b) polos contrários atraem-se.

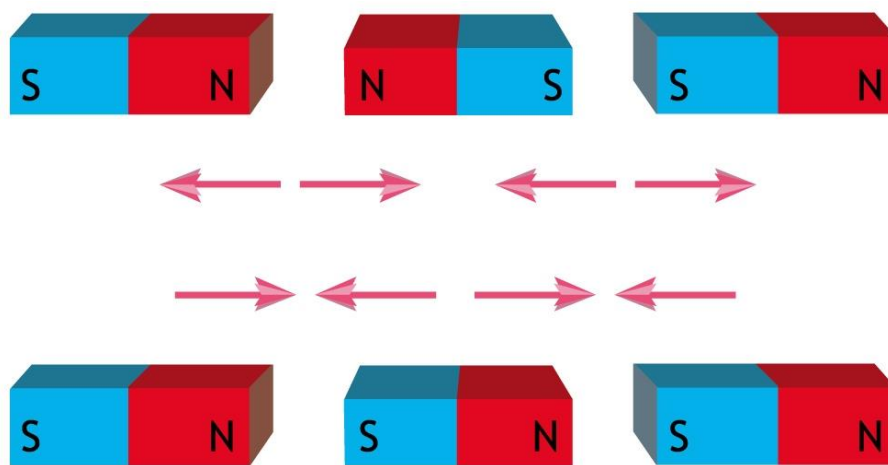


Figura 20 – Relações entre polos de ímanes (Fonte: (Enel, 2014))

Se se colocar um vidro ou uma folha de cartão sobre um íman e se se pulverizar a limalha de ferro sobre o vidro, pode-se observar que as pequenas partículas de limalha se dispõem em linhas curvas regulares que vão de um polo ao outro. Pode-se também observar que a concentração de linhas é maior junto aos polos, o que significa que a indução nesse ponto é mais forte, ou seja, as ações magnéticas são mais intensas. Ao conjunto destas linhas de limalha de ferro chama-se espectro magnético (Rodrigues, 1987).

As ações magnéticas, num campo magnético, são caracterizadas, em cada ponto, por uma intensidade (a indução magnética), que se exerce segundo uma dada direção e sentido, pelo que é representada por um vetor com (Rodrigues, 1987):

- a) Direção** – a indução tem a direção das linhas de força, sendo esta representada por um vetor tangente às linhas com o ponto de aplicação no ponto considerado;

b) Sentido – é o das linhas de força, sendo dado pela agulha magnética; e

c) Intensidade – o valor da indução num ponto depende: da fonte do campo magnético e da posição do ponto em relação a essa fonte.

3.1.2. Eletromagnetismo

As teorias relacionadas com o magnetismo remetem ao início do século XIX, quando em 1802 Gian Domenico Romagnosi afirmou que um fio ligado a uma pilha provocava um desvio na agulha de uma bússola que estivesse próxima. Esta descoberta foi apenas credibilizada em 1820 por Hans Christian Orsted (Castro, 2012). Estes fenómenos físicos continuaram a ser estudados, culminando no trabalho de James Clerk Maxwell que integrou o conhecimento existente numa única teoria, que esteve na origem das equações de Maxwell (Castro, 2012).

O eletromagnetismo representa o fundamento teórico fundamental para conhecer o funcionamento e o uso da eletricidade, bem como muitos dos equipamentos com que operamos diariamente.

Um campo elétrico é originado pela variação do fluxo magnético (fenómeno conhecido por indução eletromagnética, princípio usado nos geradores elétricos, nos motores e nos transformadores de tensão). De forma análoga, a variação de um campo elétrico gera um campo magnético. Esta correlação entre um campo elétrico e um campo magnético é definida por campo eletromagnético (Rodrigues, 1987).

3.1.3. Supercondutividade

O início do conceito de supercondutividade remete-se ao ano de 1911, quando o físico holandês Heike Kamerlingh-Onnes descobriu que o mercúrio (Hg) tinha a capacidade de transportar corrente elétrica sem nenhuma resistência aparente, quando colocado à temperatura de 4 Kelvin (Branício, 2001; Jung, 2010).

A supercondutividade advém de uma propriedade intrínseca a alguns materiais que despoletam um fenómeno quântico macroscópico, quando são colocados a temperaturas muito baixas, em que estes conduzem corrente sem resistência e se verificar perda de energia (ProjectoMaglev, 2008).

Para um material ser considerado supercondutor tem que ter duas características essenciais (ProjectoMaglev, 2008; Rodrigues, 1987):

1. **Resistividade nula**, o que significa que à medida que se desce a temperatura do material, a resistividade deste à corrente elétrica diminui. Este fenómeno explica-se através da agitação térmica das partículas, cujo valor diminui com a redução da temperatura; e
2. **Diamagnetismo perfeito**, que é um fenómeno em que o campo magnético é expelido e refletido (um material não diamagnético, quando sujeito a um campo magnético, comporta-se como o vácuo e as linhas de campo atravessam-no sem sofrerem alterações).

3.2. Leis Relacionadas com o Fenómeno de Magnetismo

De seguida, são apresentadas algumas das principais leis que constituem a base para a concretização do fenómeno de *Maglev*.

3.2.1. Equações de Maxwell

As equações de Maxwell são da autoria do físico e matemático escocês James Clerk Maxwell, e podem ser encontradas, sob outras notações matemáticas, num artigo dividido em quatro partes, intitulado *On Physical Lines of Force*, publicado entre 1861 e 1862 (Bezerra, 2006). Estas equações representam um conjunto de equações diferenciais parciais que compõe a base do eletromagnetismo clássico. As equações de Maxwell permitiram o entendimento do eletromagnetismo (Bezerra, 2006), e contribuíram de uma forma fundamental para uma revolução tecnológica iniciada no final do século XIX, e continuada durante as décadas seguintes.

De acordo com (Bezerra, 2006), as equações de Maxwell, em notação moderna, são as apresentadas na Figura 21. As famosas equações diferenciais parciais que Maxwell formulou para o campo eletromagnético estão atualmente escritas em quatro equações (Bezerra, 2006).

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t \text{ (lei da indução de Faraday)}$$

$$\text{rot } \mathbf{H} = \partial \mathbf{D} / \partial t + \mathbf{J} \text{ (lei de Ampère com corrente de deslocamento)}$$

$$\text{div } \mathbf{D} = \rho \text{ (lei de Coulomb generalizada)}$$

$$\text{div } \mathbf{B} = 0 \text{ (inexistência de monopolos magnéticos)}$$

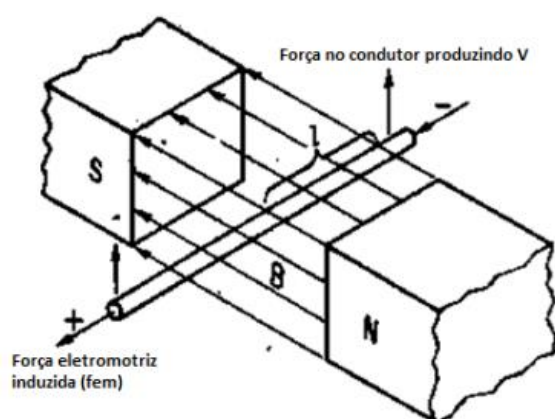
(sendo que $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$ e $\mathbf{H} = (1/\mu) \mathbf{B}$ nos meios isotrópicos)

Figura 21 – Equações de Maxwell em notação moderna (Fonte: (Bezerra, 2006))

Ainda sobre as equações de Maxwell, estas podem-se dividir em dois grupos: o grupo "microscópico" e o grupo "macroscópico" (Lencina, 2006). O primeiro grupo utiliza os conceitos de carga total e corrente total, que inclui as cargas e as correntes a níveis atômicos, que normalmente são mais difíceis de se calcular (Lencina, 2006). O segundo grupo define os dois novos campos auxiliares e que evitam a necessidade de se conhecer cargas e correntes em dimensões atômicas (Lencina, 2006).

3.2.2. Lei de Faraday

A lei de Faraday (ver Figura 22) é da autoria de Michael Faraday, físico-químico britânico. Faraday provou, em 1832, que a variação do fluxo magnético, numa espira fechada, origina uma corrente elétrica na mesma – a este acontecimento dá-se o nome de indução (Guerra, Reis, & Braga, 2004). A força eletromotriz que é induzida na espira é igual à taxa de variação do fluxo magnético através dela.



I – Representação da Lei de Faraday (Fonte: (Peixoto, 2011))

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

onde \vec{E} é a intensidade de campo elétrico (V/m),
e \vec{B} é a densidade de fluxo magnético (Wb/m²).

II – Expressão matemática da Lei de Faraday
(Fonte: (Barbosa, 2010))

Figura 22 – Lei de Faraday

3.2.3. Lei de Lenz

A lei de Lenz foi publicada em 1834, e é da autoria do físico Heinrich Friedrich Lenz (Carvalho, 2007). Esta lei permite determinar o sentido da corrente que percorre uma espira condutora fechada, sujeita a uma determinada indução. Lenz referiu que, quando um fluxo magnético variável atravessa uma espira fechada surge uma corrente na espira que se oporá à variação de fluxo que a produziu (ver Figura 23). Isto significa que o sentido da corrente induzida é tal que origina um fluxo magnético induzido que se opõe à variação do fluxo magnético indutor (Carvalho, 2007).

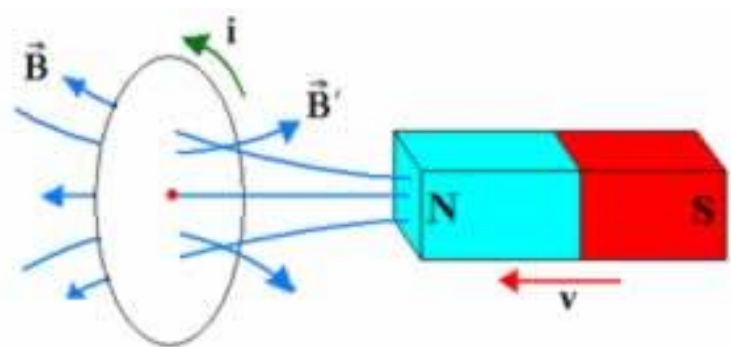


Figura 23 – Lei de Lenz (Fonte: (Silva, n.d.))

3.2.4. Efeito Meissner

O efeito Meissner, também conhecido como efeito Meissner-Ochsenfel, é a expulsão de um campo magnético num supercondutor (Ostermann, Ferreira, & Cavalcanti, 1998), tal como se pode verificar pela Figura 24. Este fenómeno verificou-se através da medição do fluxo externo a alguns condutores e detetou-se que nestes, a partir do momento em que a temperatura desce abaixo da temperatura crítica, são geradas correntes que produzem um campo magnético, o qual anula o campo externo no interior do supercondutor, expulsando dessa forma o fluxo (Ostermann et al., 1998). Esta expulsão só acontece em supercondutores homogêneos, que são designados do tipo “T”, e quando o material é arrefecido abaixo da temperatura crítica, em repouso e na presença de um campo magnético externo, que pode ser gerado, por exemplo, por um eletroímã.

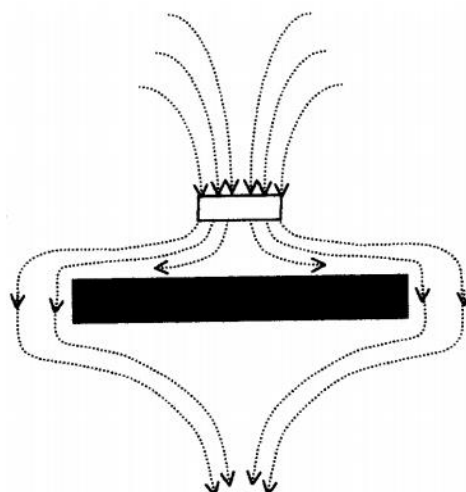


Figura 24 – Configuração resultante das linhas de fluxo no efeito Meissner (Fonte: (Ostermann et al., 1998))

No caso dos sistemas *Maglev*, é o efeito Meissner que origina a repulsão entre os materiais supercondutores da pista e a estrutura (ProjectoMaglev, 2008).

3.2.5. Lei de Biot-Savart

Quando uma corrente flui num fio condutor gera-se um campo magnético, tal como é possível verificar pela Figura 25. A lei de Biot-Savart refere-se à criação desse campo magnético. As linhas de fluxo desse campo magnético, como se pode constatar na Figura 25, são perpendiculares ao condutor em que percorre a corrente. Em particular, esta lei permite determinar o valor do campo magnético criado num determinado ponto, originado por um elemento condutor (Lima, 2006; Mundim, 1997). O valor deste campo varia de forma inversamente proporcional com a distância (perpendicular) até ao elemento condutor (Lima, 2006; Mundim, 1997).

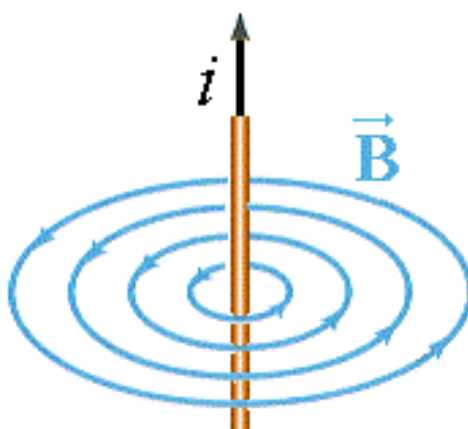


Figura 25 – Direção do fluxo magnético gerado pela corrente i (Fonte: (Mundim, 1997))

O fluxo do campo magnético pode ser calculado através de uma expressão matemática, apresentada na Figura 26.

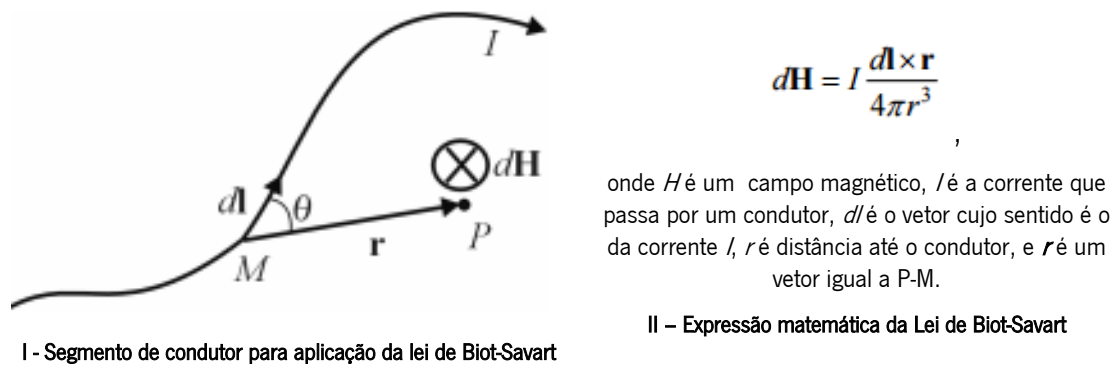


Figura 26 – Lei de Biot-Savart (Fonte: (Lima, 2006))

3.2.6. Lei de Ampère

A lei de Ampère relaciona-se com a lei de Biot-Savart, na medida em que se refere à corrente que atravessa um condutor e gera um campo magnético. A lei de Ampère é da autoria do físico e matemático André Marie Ampère (Guimarães, 2010). Segundo esta lei, quando um condutor é percorrido por uma determinada corrente, gera-se um campo magnético. Se imaginarmos que agarramos esse elemento condutor com a mão direita, em que o polegar esteja na direção do sentido da corrente, os dedos curvam-se na direção das linhas do fluxo do campo magnético (Prevedel, 2007). Estas linhas são circunferências concêntricas com o condutor em que a corrente atravessa (ver Figura 27).

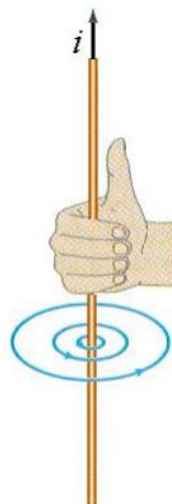


Figura 27 – Lei de Ampère: regra da mão direita para determinar o campo magnético gerado pela corrente no fio (Fonte: (Prevedel, 2007))

A lei de Ampère relaciona o produto do diferencial do comprimento do condutor com o fluxo magnético, que é igual à corrente que percorre o circuito com a permeabilidade magnética no vazio (Guimarães, 2010).

Matematicamente, esta pode ser expressa pela seguinte equação (Guimarães, 2010):

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

, onde B é um o campo magnético, I é a intensidade da corrente elétrica, r é a distância do condutor, e μ é uma constante conhecida.

3.2.7. Efeito de Hall

A descoberta do efeito de Hall (ver Figura 28) é da autoria de Edwin Herbert Hall, físico Norte-Americano (Du & Pepka, 2007). Esta descoberta possibilitou o desenvolvimento dos sensores de efeito de Hall, que permitem o controlo da posição dos polos em diferentes tipos de motor (Castro, 2012; Du & Pepka, 2007). Este efeito é o responsável pela diferença de potencial numa superfície condutora quando esta está na presença de um campo magnético perpendicular ao fluxo da corrente elétrica (Castro, 2012; Du & Pepka, 2007).

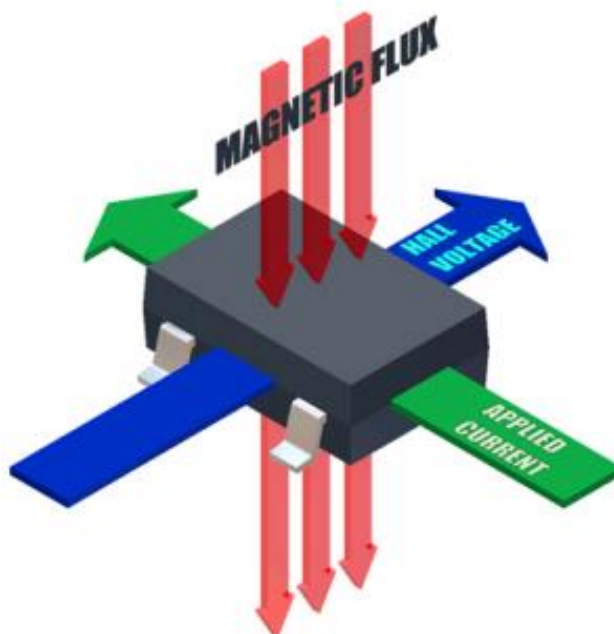


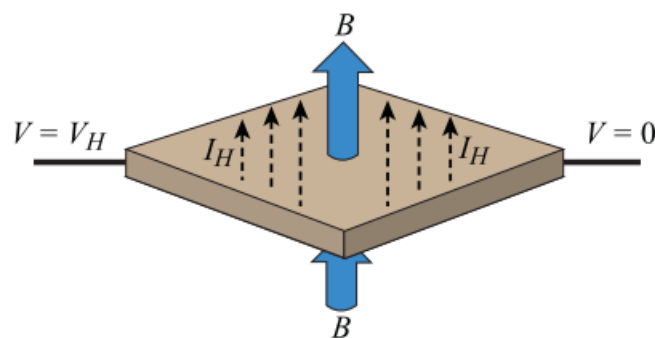
Figura 28 – Efeito de Hall (Fonte: (Du & Pepka, 2007))

À descoberta deste fenómeno, durante muitos anos, não se deu grande relevância, em função de a tensão de saída do sensor ser muito baixa e, desta forma, poder ser facilmente alterada por fatores externos – o que não sucede atualmente, devido aos avanços da eletrónica, o que possibilita que estes sensores possam ser usados em ambientes externos garantindo a sua qualidade (Castro, 2012; Du & Pepka, 2007).

Esta lei pode ser descrita através da seguinte expressão (Milano, 1879):

$$\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B}, \text{ onde } q \text{ é uma carga elétrica e } \vec{v} \text{ a velocidade instantânea em m/s.}$$

O princípio físico para que o efeito de Hall se verifique é a força de Lorentz (ver Figura 29), que enuncia que, quando uma corrente percorre uma superfície condutora e se aplica um campo magnético, a força desse campo faz com que a corrente circule pela parte lateral da superfície, provocando, dessa forma, uma tensão (de Hall) (Du & Pepka, 2007).



I – Efeito Hall e força de Lorentz

$$V_H = \frac{I \cdot B}{\rho_n \cdot q \cdot t}$$

onde ρ_n é o n° de cargas por unidade de volume, e t a espessura da superfície condutora.

II – Equação correspondente

Figura 29 – Efeito Hall e força de Lorentz (Fonte: (Du & Pepka, 2007))

3.3. Componentes Eletromecânicos

3.3.1. Ímanes Permanentes (PM)

Uma barra de ferro macio (substância ferromagnética), quando colocada em contacto, ou na proximidade, com um íman, adquire a propriedade de atrair limalha de ferro, isto é, a barra magnetiza-se sob a influência do íman e por isso damos a este fenómeno o nome de magnetização por influência.

Este fenómeno é temporário e atenua-se, ou desaparece quase completamente, quando afastado da causa que lhe deu origem. Depois do afastamento desse campo magnético, à magnetização que ainda fica nessa substância ferromagnética dá-se o nome de magnetização permanente ou remanescente (Rodrigues, 1987). Essa magnetização remanescente é quase nula para o ferro macio e elevada para o aço e para certas ligas especiais, tal como o alnico (liga de ferro, alumínio, níquel e cobalto). Assim, a grande parte dos ímanes artificiais é de materiais com elevadas propriedades de magnetização, designando-se como ímanes permanentes (ver Figura 30). Como a magnetização remanescente vai se perdendo ao longo do tempo, ainda que muito lentamente, pode-se evitar esta perda conservando os polos ligados por uma barra de ferro macio, à qual se dá o nome de armadura (Rodrigues, 1987).

Refira-se que, nos últimos anos, este tipo de ímanes tem despertado especial interesse, especialmente devido às propriedades que algumas ligas possuem, tais como: *Samarium Cobalt* (SmCo), *Alnico* (AlNiCo), *Ceramic* e *Neodymium Iron Boron* (NdFeB), destaca-se este último, que também é conhecido como super íman, da sua incrível relação de indução/peso (Silva, 2012). Este tipo de ímanes, em função destas características, é utilizado nos sistemas de *Maglev*, como por exemplo no *Inductrack*.

Em relação a estes componentes, é pertinente olhar para a sua situação de mercado, no âmbito da sua disponibilidade e do seu preço, em função das elevadas quantidades necessárias para aplicações deste tipo de tecnologia. Refira-se que a fabricação de ímanes permanentes de alto desempenho é possível somente com a utilização das terras raras, o grupo de 17 elementos químicos no qual está presente o neodímio (IPT, 2011). O mercado é

atualmente dominado pela China, mas as recentes reduções nas quantidades de materiais que o país pode exportar aumentaram as dúvidas pela continuidade do abastecimento e impulsionaram projetos de desenvolvimento em todo o mundo, principalmente no Canadá e na Austrália (IPT, 2011).

O quadro de preocupação foi agravado com um relatório publicado em dezembro de 2010 pelo Departamento de Energia dos EUA, que identificou seis elementos de alta vulnerabilidade a questões do fornecimento e do preço para aplicação em tecnologias limpas – cinco deles são terras raras, entre os quais o neodímio (IPT, 2011). Para completar o cenário, a *Industrial Minerals Company of Australia* calculou as estimativas globais de procura de terras raras para os próximos anos. A fatia de mercado destinada aos fabricantes de ímanes permanentes deve aumentar dos 21% de 2010 para 26% em 2015, e o volume de insumos para os processos industriais passar de 26 mil para 48 mil toneladas (IPT, 2011).

Ainda de referir que atualmente existe a possibilidade de reprocessar o neodímio-ferro-boro através de técnicas que combinam etapas de hidrogenação, desproporção (transformação da fase magneticamente dura em outras fases), dessorção (extração de hidrogénio da estrutura cristalina do composto previamente hidrogenado) e recombinação (obtenção da fase magneticamente dura com tamanho de grão inferior ao inicial) em ligas à base de neodímio-ferro-boro (IPT, 2011).



Figura 30 – Exemplos de ímanes permanentes (Fonte: (Strong Magnet Inc., n.d.))

3.3.2. Eletroímans

Um eletroíman é uma bobina com um núcleo de substância ferromagnética. Para melhor se compreender o seu modo de funcionamento, e como se realiza o seu dimensionamento, o ponto de partida deverá ser a compreensão de um solenóide.

Um solenóide é uma bobina comprida, ou seja, um conjunto de espiras contíguas, circulares e iguais, de fio condutor isolado, por onde se faz passar uma determinada corrente elétrica (ver Figura 31). Esse fio condutor pode ser enrolado num tubo de cartão, de madeira, de vidro ou de outra substância isolante (Rodrigues, 1987).

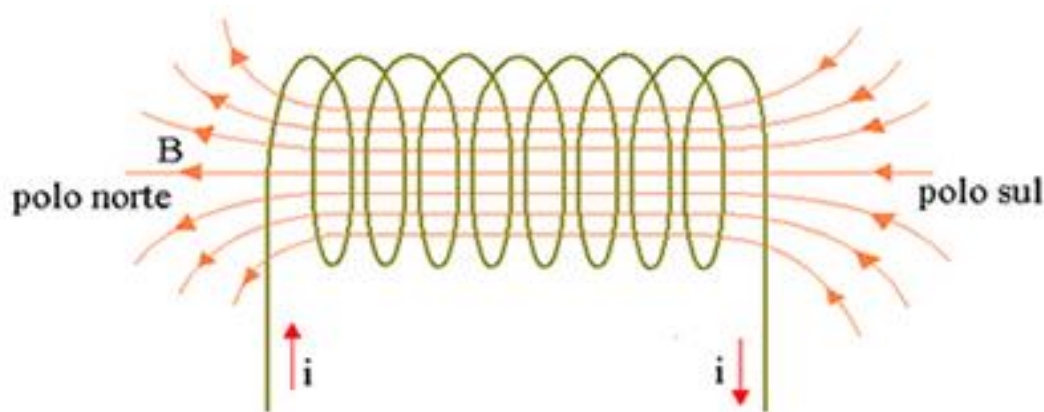


Figura 31 – Exemplo de um solenoide (Fonte: (Marques, 2014))

No exterior da bobina, criam-se linhas de força que são semelhantes às que se obtêm com um íman retilíneo e no seu interior prolongam-se paralelamente em relação ao eixo da bobina, enquanto algumas linhas projetam-se pela superfície lateral (Rodrigues, 1987).

Tal como um íman, uma bobina tem face norte e face sul, e no seu interior a indução dirige-se da face sul para a face norte. Estas faces são designadas também como polos magnéticos.

Como se deduz, um íman e um solenóide apresentam diversas características comuns:

- 1) ambos têm um polo norte e um polo sul;
- 2) o solenóide orienta-se na direção norte-sul;
- 3) entre dois solenóides manifestam-se também ações de atração e repulsão entre os polos (Rodrigues, 1987).

Colocando um núcleo de ferro macio na bobina, verifica-se um aumento da indução. Isto é de esperar pois, como referido, o ferro macio magnetiza-se quando se encontra num campo magnético. A barra de ferro macio fica com a mesma polaridade da bobina e os seus campos magnéticos somam-se, resultando um campo muito mais intenso. O espectro magnético resultante apresenta a forma visível na Figura 32.

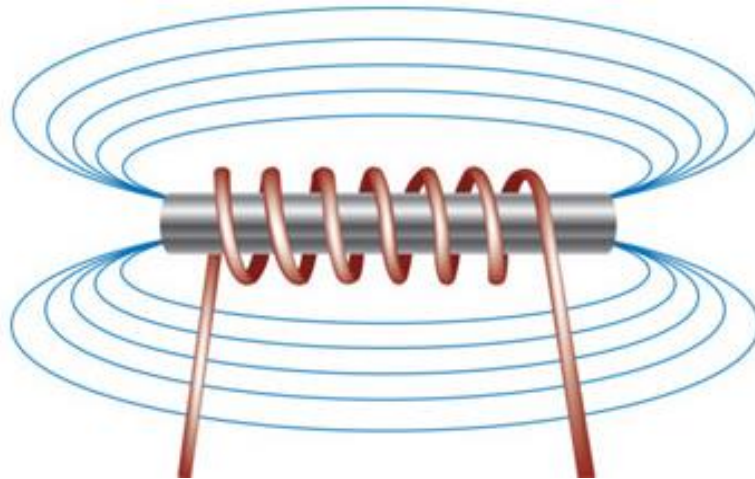


Figura 32 – Exemplo de um eletroímã (Fonte: (Brain & Looper, 2000))

Uma das características dos eletroímãs é a possibilidade de estes funcionarem como um ímã temporário, pois, ao desligar-se a corrente que excita a bobina, deixará de haver campo magnético, porque se extingue o campo criado pela corrente elétrica e a barra desmagnetiza-se (magnetismo remanescente nulo). Se desligarmos a corrente, deixa de haver campo magnético, porque desaparece o campo criado pela corrente elétrica e a barra desmagnetiza-se (magnetismo remanescente nulo). Obtém-se desta forma um ímã temporário, a que damos o nome de eletroímã. Um eletroímã é, portanto, uma bobina com um núcleo de substância ferromagnética.

3.3.3. Supercondutores

Os supercondutores são materiais com capacidade para fazer o desaparecimento total da sua resistência elétrica, quando colocados abaixo de uma determinada temperatura crítica (Branício, 2001). Essa temperatura é normalmente baixa, e específica do próprio material.

Existem vários materiais que, com uma temperatura abaixo de 10 Kelvin, se tornam supercondutores, tais como: o cádmio, o zinco, o estrôncio, o chumbo (Branício, 2001; Jung, 2010; Ostermann et al., 1998), entre outros. Também foram descobertos alguns materiais orgânicos que se tornam supercondutores a baixas temperaturas, e esses supercondutores não são apenas condutores perfeitos, também possuem a propriedade de expulsar os campos magnéticos no seu interior, originando o efeito de Meissner (Ostermann et al., 1998), já descrito anteriormente. Dentro dos vários materiais supercondutores, existem também os materiais cerâmicos, de fácil ativação, quando em contacto com azoto líquido (ProjectoMaglev, 2008).

Há ainda os materiais que, quando constituídos por óxidos de certos elementos, como o lantânio ou o bário, tornam-se supercondutores a temperaturas não tão baixas, como é exemplo da porcelana (ProjectoMaglev, 2008). De referir que os materiais cerâmicos se assumem como dos principais materiais supercondutores utilizados, em função da sua ativação a temperaturas menos baixas.

3.3.4. Comparação

Os principais elementos eletromecânicos para a concretização do fenómeno *Maglev* são: os PM, os eletroímãs, e os supercondutores. A Tabela 5 captura as principais características de cada um, de modo a sintetizar as mesmas.

Tabela 5 - Principais características distintivas dos PM, eletroímãs e supercondutores

| Características Peculiares | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ímãs Permanentes (PM) | Eletroímãs | Supercondutores |
| <p>(1) Novas ligas com maior capacidade de indução começam a ser usadas em sistemas de transportes;</p> <p>(2) Não necessitam de energia para produzir um campo magnético; e</p> <p>(3) Podem ser usados à temperatura ambiente.</p> | <p>(1) Podem produzir induções mais intensas e de intensidade variável;</p> <p>(2) É fácil trocar a polaridade do campo magnético; e</p> <p>(3) Campo magnético existe enquanto desejado (íman temporário).</p> | <p>(1) Funcionamento dependente de baixas temperaturas, aumentando o seu custo;</p> <p>(2) Condutividade praticamente sem perda de energia; e</p> <p>(3) Capacidade para gerar campos magnéticos intensos.</p> |

3.4. Síntese do Capítulo

Este capítulo apresentou os conceitos de magnetismo, eletromagnetismo e supercondutividade. Magnetismo corresponde ao fenómeno físico da propriedade de corpos atraírem outros materiais. Eletromagnetismo representa o fundamento teórico fundamental para conhecer o funcionamento e o uso da eletricidade, dos quais se salientam conceitos como: campo elétrico; indução eletromagnética; e campo magnético. Supercondutividade corresponde à propriedade de alguns materiais, quando a baixas temperaturas críticas, conduzem corrente sem resistência elétrica.

De seguida, o capítulo abordou algumas leis e efeitos fundamentais para a concretização do fenómeno de *Maglev*, nomeadamente: as equações de Maxwell; a lei de Faraday; a lei de Lenz; o efeito Meissner; a lei de Biot-Savart; a lei de Ampère; e, por fim, o efeito Hall. Para cada um destes sete, é dado a conhecer os seus fundamentos teóricos, bem como a sua importância no contexto do fenómeno de *Maglev*.

Na fase final, o capítulo também descreveu três dos mais recorrentes componentes eletromecânicos utilizados no fenómeno de *Maglev*, a saber: ímanes permanentes (PM); eletroímanes e supercondutores. Ímanes Permanentes (PM) dizem respeito à grande parte dos ímanes artificiais com materiais de elevadas propriedades de magnetização. Eletroímanes correspondem a bobinas com um núcleo de substância ferromagnética. Supercondutores são materiais com capacidade para fazer o desaparecimento total da sua resistência elétrica, quando colocados abaixo de uma determinada temperatura crítica.

(ESTA PÁGINA FOI INTENSIONALMENTE DEIXADA EM BRANCO)

Capítulo 4. Sistemas de Transporte de Bens e Mercadoria (Carga) em Indústria

Para alcançar os objetivos desta dissertação, estabelecidos no capítulo inicial e que está relacionado com o estudo da aplicação dos sistemas *Maglev* como alternativa às soluções de transporte convencionais de mercadorias, é necessário conhecer o estado atual destes meios e as suas características, de forma a alcançar conclusões relativamente a esta aplicação.

Assim sendo, este capítulo está organizado de modo a: (1) distinguir os vários tipos de transportes de bens e mercadorias; (2) fornecer uma visão global do papel dos sistemas de transporte de bens e mercadorias; (3) identificar os principais desafios que esta área enfrenta atualmente; (4) apresentar vantagens e desvantagens dos meios ferroviários como transporte de bens e mercadorias; e, no final, (5) dar a conhecer dois exemplos onde a utilização do caminho-de-ferro constitui uma vantagem para a indústria.

4.1. Definição de Sistemas de Transporte

4.1.1. Transportes Internos e Externos

Os tipos de transportes de carga podem distinguir-se em função da sua finalidade, dando origem à classificação: transportes internos e transportes externos. Estas duas áreas distintas de transportes são caracterizadas da seguinte forma:

- 1) **Transportes internos**, que se referem ao processo de transporte de materiais que ocorrem no interior de uma empresa, em ambiente produtivo, relacionados com o abastecimento das linhas de produção, e com o armazenamento de matérias-primas e materiais em processo, que representam uma parte significativa dos custos de produção (França, 2013).

Das principais atividades relacionadas com o transporte interno, salientam-se as seguintes: (a) planeamento das operações; (b) execução adequada das operações; (c) utilização económica do equipamento do transporte; (d) obtenção do custo de transporte; (e) manutenção; e (f) treino dos operadores de equipamentos (França, 2013). A Figura 33 apresenta diversas aplicações deste tipo de transporte.



I – Transporte de caixas/ *containers* para movimentação de materiais



II – Transporte sobre o piso – empilhadoras



III – Transporte aéreo com pontes rolantes



III – Transporte sobre esteiras

Figura 33 – Diversas aplicações do transporte interno (Fonte: (França, 2013))

2) **Transportes externos**, que se referem ao processo de transporte de materiais dos fornecedores de matérias-primas, bem como ao processo de distribuição do produto final até ao cliente, processo que também acresce custos ao produto (França, 2013). Existem cinco modais de transporte externo, tal como é possível verificar na Figura 34.

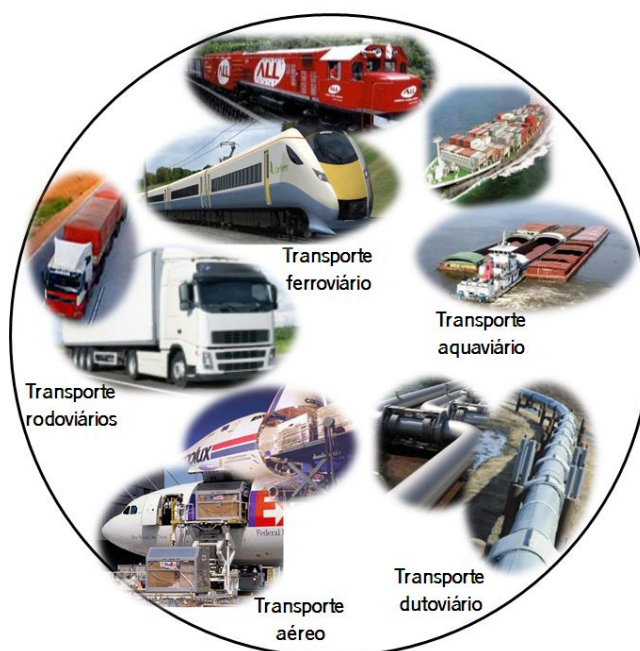


Figura 34 – Os cinco modais de transportes externos

Dado o propósito da presente dissertação, o transporte interno não será aqui aprofundado. Além disso, é dada especial atenção a um tipo particular de transportes externos, os meios ferroviários, pois faz sentido, no âmbito deste trabalho, analisar a adequação dos sistemas de transporte roda-carril convencionais com os sistemas *Maglev*, em virtude de serem estes os que mais se relacionam.

4.1.2. Transporte de Bens e Mercadorias

Genericamente, os transportes constituem um elemento determinante no desenvolvimento da economia e no bem-estar das comunidades, bem como são considerados o principal elemento do processo logístico (Pinto, 2010). No âmbito deste trabalho, apenas são abordados os transportes de bens e mercadorias em contexto industrial. Este tipo de transporte é determinante na cadeia de valor na indústria de manufatura (PwC, 2013). Com o aumento da especialização e da globalização, a produção de produtos é realizada cada vez mais distante dos centros de consumo, aumentando a necessidade de transporte (PwC, 2013). Este processo de transferência de produtos entre produtor, fornecedores e clientes é gerido pelos departamentos de logística das empresas, e inclui o armazenamento, o transporte, o transbordo, e a embalagem, com todas as trocas de informações necessárias (Pinto, 2010).

Atualmente, com a padronização dos contentores de carga em todos os veículos e em todos os portos, houve uma revolução no comércio nacional e internacional, pois esta normalização representa uma enorme redução nos custos de transbordo. Anteriormente, toda a carga tinha que ser carregada manualmente e descarregada para o curso de um navio ou outro transporte. Com a criação deste padrão a manipulação e transferência de contentores automático permite ganhos de economia de escala na operação dos veículos. Este fator representa um aspeto importante no âmbito do aumento do comércio internacional e da globalização.

De acordo com Alvarenga & Novaes (2000), na elaboração de um sistema de transporte é necessária uma visão global, que contemple o planeamento, mas para isso é preciso que se conheçam alguns dados muito importantes, nomeadamente: os fluxos nas diversas ligações da rede; o nível de serviço atual; o nível de serviço desejado; as características da carga; os tipos de equipamentos disponíveis e suas características (capacidade, fabricante, etc.); entre outros. Em particular na informação sobre a carga, é fundamental conhecer-se características/parâmetros como: o peso; o volume, a densidade média; a dimensão da carga; a dimensão do veículo; o grau de fragilidade da carga; o grau de perecibilidade; o estado físico; a assimetria; e a compatibilidade entre cargas diversas (Alvarenga & Novaes, 2000; Ballou, 2001). Devido a estas características/parâmetros, a seleção de um modo de transporte pode ser utilizada como uma vantagem competitiva (Ballou, 2001), tendo impacto significativo na qualidade dos serviços logístico que engloba dimensões como: o tempo de entrega, a confiabilidade e a segurança dos produtos (Ballou, 2001).

A gestão de um sistema de transporte de uma empresa engloba decisões sobre um amplo conjunto de aspetos. Estas decisões podem ser divididas em dois grandes grupos (Fleury, 2002):

(1) Decisões estratégicas, que se referem aos impactos a longo prazo, e aos aspetos estruturais. De entre as suas responsabilidades, salientam-se: escolha de modais; decisões sobre propriedade da frota; seleção e negociação com transportadores; e política de consolidação de cargas.

(2) Decisões operacionais, que são relativas a aspetos de curto prazo e às tarefas do dia-a-dia dos responsáveis pelo transporte.

Relativamente aos custos envolvidos em sistemas de transporte, diversos estudos indicam que os transportes representam, em média, 60% dos custos logísticos e constituem aproximadamente 3,5%¹ da faturação global de uma empresa (Fleury, 2002). Isto significa que os transportes representam o elemento mais importante do custo logístico em grande das empresas, bem como representam um papel essencial na prestação do serviço ao cliente.

Relativamente ao transporte externo, podem ser distinguidos dois tipos de custos: os fixos e os variáveis, consoante a distância percorrida. Enquanto o primeiro diz respeito é independente da deslocação (exemplos: seguro do veículo e custos administrativos), o segundo varia de acordo com a distância percorrida (exemplos: custos com combustíveis e com pneus) (Fleury, 2002). Existem algumas ações que podem contribuir para a redução dos custos de transportes externos, sobretudo os variáveis, nomeadamente: melhoria no planeamento de rotas e meios de transporte; diminuição da variabilidade do volume da carga; aumentar a utilização da frota (Fleury, 2002), entre outras.

4.1.3. Tipos de Transportes de Bens e Mercadorias

De todos diferentes tipos de transportes, os mais vulgarmente referidos são: o rodoviário, o ferroviário, o marítimo e o aéreo (ver Figura 35). De acordo com o Eurostat (2009), entre 1995 e 2006 a quantidade de bens transportados evoluiu cerca de 1,3 biliões tkm (toneladas-quilómetro) para 1,9 tkm, onde o meio de transporte rodoviário foi o mais recorrente, representando aproximadamente 45% do total de bens transportados na Europa em 2006.

¹ Tipicamente, quanto menor é o valor agregado do produto, maior será a contribuição das despesas de transporte nas finanças das empresas (Fleury, 2002).

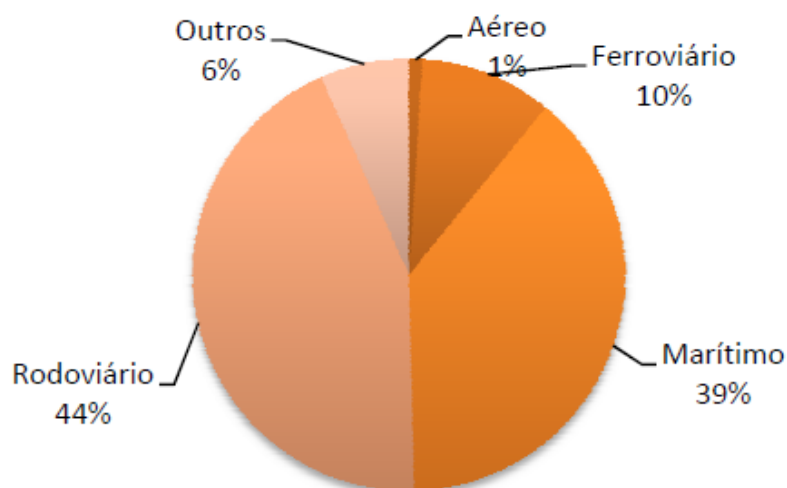


Figura 35 – Tipos de transportes utilizados na União Europeia em 2006 (Fonte: (Eurostat, 2009))

Estudos da Comissão Europeia em 2008 preveem o crescimento do transporte rodoviário relativamente ao transporte de mercadorias até 2020, tal como o consequente consumo de energia e impacto no meio ambiente – estima-se um crescimento de 15% nas emissões de dióxido de carbono (CO₂), mesmo tendo em conta os planos de mudança para as energias renováveis. Isto significa que existe a necessidade de soluções inovadoras no âmbito dos sistemas de transporte, com o propósito de tornar o sector mais competitivo e eficiente, sobretudo em termos de impacto ambiental (European Commission, 2008).

Destes quatro tipos de transportes, cada um possuiu as suas próprias características, que os tornam mais adequados para certos tipos de operações e produtos. Os critérios de seleção devem sempre levar em consideração aspetos como: (1) o tamanho da carga, (2) a velocidade, (3) os custos, (4) a resposta ao serviço, e (5) o stock (ver Figura 36). É importante referir que as diferenças entre estas opções tendem a ser significativas. Em particular no que concerne aos custos, no caso de um transporte de carga fechada de longa distância, verifica-se que, em média, os custos tendem a ser mais elevados, por ordem decrescente: modo aéreo, seguido pelo rodoviário, ferroviário, dutoviário e aquaviário (Junior, 2006).

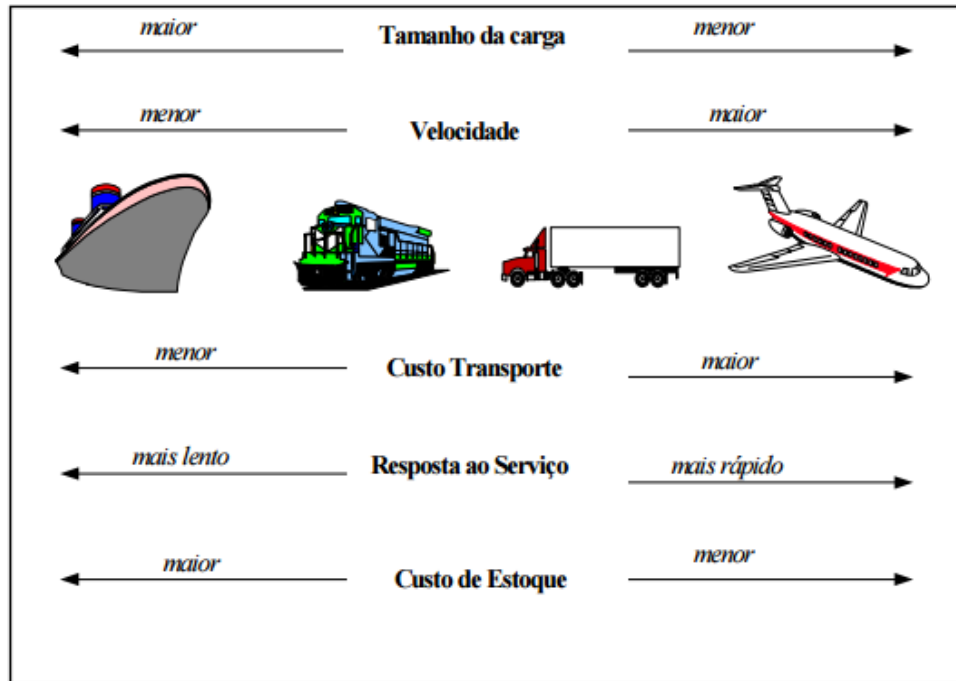


Figura 36 – Aspectos relevantes para selecionar o tipo de transporte (Fonte: (Monteiro, 1997))

4.2. Desafios Atuais do Transporte de Bens e Mercadorias

De acordo com Lautso et al. (2006), prevê-se que o impacto da globalização sobre o comércio mundial e resultantes fluxos de transporte vá causar uma discrepância entre as importações e exportações, relacionadas com as economias emergentes asiáticas. Com o crescimento destas, os fluxos de transporte entre a Europa e a Ásia crescerão, em contraponto com os fluxos de transporte entre a Europa e Estados Unidos. Desta forma, prevê-se que as importações provenientes das nações asiáticas tenderão a ganhar destaque, nomeadamente devido aos reduzidos custos de produção praticados nessas nações.

Lautso et al. (2006) referem ainda que, dentro dos próximos vinte anos, os fluxos de transporte entre a Europa e a Ásia tenderão a duplicar. Com esta tendência, é necessário um alinhamento dos corredores de transporte na Eurásia, que se focará especialmente nos modos de transporte rodoviário e ferroviário, devido a: serem modos de transporte menos custosos, e devido à ligação, por terra, entre os dois continentes.

De destacar ainda que, desde meados de 1950, que têm vindo a haver esforços na elaboração de uma rede ferroviária Eurasiática. Todavia, por questões políticos e económicos, entre os anos 60 e 80 houve um abrandamento deste empreendimento, permitindo somente depois do fim da Guerra Fria surgisse uma retoma pelo interesse da elaboração de uma rede ferroviária internacional (Pinto, 2010). Todavia, atualmente, ainda não existe nenhuma rede consolidada de transporte ferroviário de mercadorias.

No que concerne à evolução dos transportes em Portugal, a inauguração da primeira linha ferroviária é datada de 28 de Outubro de 1856, onde o comboio – batizado de D. Pedro – partia da Estação de Santa Apolónia e ligava, pela primeira vez, Lisboa ao Carregado (Junior, 2006; Pereira, 2013). Ao longo da segunda metade do século XIX, seriam construídas várias linhas de caminho-de-ferro que chegariam às províncias nacionais (Pereira, 2013). A linha do Norte (Lisboa – Porto) ficou concluída, até Vila Nova de Gaia, em 1864, um ano após a apelidada linha do Leste (Lisboa – Elvas – Badajoz) (Junior, 2006). No Norte, a construção seguia, e em 1875 chegava a Braga, em 1886 à Galiza e em 1877 Gustave Eiffel ligava Vila Nova de Gaia ao Porto através da Ponte D. Maria Pia (Junior, 2006). Em 1945, o governo português decide atribuir todas as concessões de linhas férreas (exceto a linha de Cascais) à Companhia dos Caminhos de Ferro Portugueses (CP), que a partir de 1910, devido à Implantação da República, tinha abandonado o nome de Real (Junior, 2006). Em 1948, começam a atravessar as linhas as primeiras locomotivas a Diesel, e no início dos anos 1950 é eletrificada a linha de Cintra, dando início à eletrificação da Linha do Norte (Junior, 2006). A eletricidade, o diesel e o vapor (que só deixaria de existir em 1977), conviviam nas estradas de ferro portuguesas (Junior, 2006).

Nos anos 1980 assistiu-se ao encerramento de muitas estações ferroviárias, bem como linhas foram desativadas (Junior, 2006). Esta situação tornou-se comum em várias regiões de Portugal, muito por causa do crescimento do transporte rodoviário, que se tornou cada vez mais acessível. Todavia, nos últimos anos esta tendência foi se alterando com a construção de uma nova travessia entre Porto e Gaia para substituir a centenária ponte D. Maria Pia, também com a construção em Lisboa da Gare do Oriente; a ligação ferroviária entre Lisboa e a margem sul do rio Tejo pela Ponte 25 de Abril e a discussão da introdução dos comboios de alta velocidade, orientada para transportes de mercadorias (Junior, 2006).

Em Portugal, o transporte rodoviário de cargas realiza maioritariamente por transportes rodoviários, enquanto o transporte ferroviário transporta cerca de 3% do volume total de mercadorias (Junior, 2006). A ANTRAM, instituição que dispõe de dados relativos ao transporte de mercadorias sob a perspetiva de distâncias, verificou que, relativamente à maior parte do que é transportado em Portugal, cerca de 76% percorrem distâncias inferiores a 50 Km, 14% das toneladas transportadas percorrem entre 50 e 99 Km, 5% entre 100 e 149 Km, 4% no patamar de 150 e 299 Km e apenas 1% em distâncias superiores a 300 Km (Junior, 2006). Além disso, as distâncias inferiores a 50 Km representam 79% das toneladas transportadas, e as mercadorias transportadas em distâncias superiores a 100 Km têm maior importância no setor público (Junior, 2006).

4.3. Vantagens e Desvantagens do Transporte Ferroviário de Bens e Mercadorias

Começando com a análise aos sistemas tradicionais, um comboio de carga é constituído por um conjunto de vagões de mercadorias rebocados por uma locomotiva num caminho-de-ferro, que realiza uma parte do caminho entre o fornecedor e o cliente pretendido, como parte da cadeia logística.

Quando considerados em termos de toneladas-quilómetro por unidade de energia consumida, estes transportes são considerados mais eficientes do que qualquer meio de transporte (Pinto, 2010). Esta vantagem é mais pronunciada quando se tratam de transportes de grandes distâncias. Apesar desse aspeto positivo significativo, destaca-se como ponto negativo a falta de flexibilidade que os transportes por via-férrea representam, quando comparados, por exemplo, com um transporte realizado por estrada (Pinto, 2010). Este fator faz com que, muitos transportes, mesmo que de longas distâncias, se realizem no domínio do transporte rodoviário.

Outra desvantagem que o transporte de mercadorias por via ferroviária tem está relacionada com os custos de transbordo, especialmente quando o fornecedor ou o cliente não têm acesso direto aos terminais ferroviários (Pinto, 2010). A utilização de contentores tem como grande objetivo a redução deste custo. Note-se que, tradicionalmente, dado este tipo de encargos, havia o interesse de os grandes fornecedores de materiais, fábricas e armazéns construírem as suas instalações próximo das linhas ferroviárias e inclusive em terem uma secção da pista para a sua propriedade, onde os bens era carregados/descarregados através de vagões.

O transporte ferroviário utiliza muitos tipos de vagão para o transporte de cargas, estes incluem vagões caixa, vagões cobertos para mercadorias em geral, plataformas, para cargas pesadas ou volumosas, vagões refrigerados para transporte de alimentação, vagões abertos, para transporte de minerais, etc.

4.4. Exemplos de um Sistema de Transporte Ferroviário de Bens e Mercadorias: o *Juice Train* e o *Raillex*

Alguns dos sistemas de transporte ferroviários de bens e mercadorias tiveram grande desenvolvimento nos Estados Unidos da América, alguns exemplos são: o *Juice Train* e o *Raillex*. O exemplo que se segue diz respeito ao primeiro.

O *Train Juice* é o nome do popular comboio de sumos de laranja fresco *Tropicana*, operado nos Estados Unidos. A *Tropicana Products* foi fundada em 1947, na Florida por Anthony T. Rossi, imigrante italiano (Allen & Albala, 2007; World Heritage Encyclopedia, n.d.). Inicialmente a distribuição do sumo de laranja fresco era entregue em mão, em frascos de sumo, mas o aumento da procura, especialmente em Nova Iorque, foi criado, em 1957, um navio transportava 5.700 m³ de sumo, todas as semanas, para Nova Iorque (Allen & Albala, 2007; World Heritage Encyclopedia, n.d.).

Em 1970, o sumo de laranja *Tropicana* começou a ser transportado em vagões isolados. No ano seguinte, a empresa operava em dois comboios com 60 unidades de carga por semana, cada uma com cerca de 3.800 m³ de sumo (World Heritage Encyclopedia, n.d.). No dia 7 de junho de 1971, o *Great White Juice Train* (a primeira unidade de comboio na indústria alimentar) consistia num comboio que transportava toneladas de vagões isolados fabricados na Virgínia (Allen & Albala, 2007; World Heritage Encyclopedia, n.d.) Além disso, pequenas unidades de refrigeração mecânica foram instaladas para manter a temperatura constante em dias quentes (Allen & Albala, 2007).

No total, a *Tropicana* economizou 40 milhões de dólares em custos de combustível durante os primeiros dez anos de operação (VRE, 2007). Além disso, no século XXI, os comboios do sumo da *Tropicana* têm sido o foco de estudos de eficiência e receberam diversos prêmios (VRE, 2007), pois são considerados excelentes exemplos de um moderno transporte ferroviário.

O *Railex LLC* é um fornecedor de serviços de transporte ferroviário refrigerado no transporte de frutas, legumes e outras mercadorias sensíveis à temperatura (World Heritage Encyclopedia, n.d.). O *Railex* é constituído por 55 grandes unidades refrigeradas e realiza partidas e chegadas regulares num horário de serviço de cinco dias (World Heritage Encyclopedia, n.d.). Este serviço tem redução das emissões de CO₂, quando comparado com o transporte rodoviário convencional. O sistema *Railex* é baseado na carga de paletes, que é carregado e descarregado dentro de um espaço em temperatura controlada nas docas, que preservam a cadeia de frio para a carga (World Heritage Encyclopedia, n.d.).

4.5. Síntese do Capítulo

O transporte de bens e mercadorias (carga) pode dividir-se em: interno e externo. Enquanto o primeiro refere-se à movimentação de materiais no interior da empresa, o segundo refere-se à movimentação de materiais no exterior da empresa. Em particular, existem cinco modais de transporte externo: ferroviário, rodoviário, aquaviário, aéreo e dutoviário. A seleção de um modo de transporte em particular pode ser utilizada como uma vantagem competitiva para a organização, além de que os transportes representam, em média, 60% dos custos logísticos.

Esta dissertação foca particularmente no transporte ferroviário externo. Este meio de transporte apresenta diversas vantagens e desvantagens face aos restantes quatro, das quais se salientam: (1) redução da emissão de CO₂ comparativamente ao meio mais utilizado – o rodoviário; (2) flexibilidade para transportar cargas elevadas; (3) pouca flexibilidade no trajeto da carga; (4) custos de transborde, entre outros.

Atualmente, existem desafios que o transporte de bens e mercadorias enfrenta, nomeadamente: (1) como assegurar os fluxos de transporte entre a Europa e a Ásia?; (2) como construir uma rede global de transporte ferroviário?; e (3) como reduzir significativamente o impacto ambiental dos transportes?.

O *Juice Train* e o *Railex* são dois exemplos da utilização bem-sucedida do transporte ferroviário de carga, o primeiro relacionado com a distribuição de sumos, e o segundo relacionado com a distribuição de frutas, legumes e outras mercadorias sensíveis à temperatura.

Capítulo 5. Aplicações da Tecnologia *Maglev* aos Transportes de Carga em Indústria

Este capítulo apresenta soluções de transporte de cargas em indústria que já utilizam os princípios *Maglev*. Atualmente, já existe na literatura muita informação sobre este tema. Apesar desta tendência, a maioria desta informação diz respeito a protótipos e exemplos de transporte de cargas de pequena dimensão e de transporte de passageiros.

Este capítulo está organizado de modo a: (1) identificar as soluções atualmente existentes para o transporte de carga na indústria, quer transportes internos quer transportes externos; (2) apresentar vantagens e desvantagens das soluções atuais para transporte interno e externo com aplicação da tecnologia *Maglev*, dando especial ênfase no transporte externos de carga; e (3) discutir algumas tendências e desafios futuros nesta temática.

5.1. Soluções Atuais

5.1.1. Transportes Internos

No âmbito dos transportes internos, ou seja, em ambiente produtivo, as pesquisas realizadas identificaram duas soluções, já existentes no mercado, desenvolvidas pela *Magnemotion Inc.*, nomeadamente: o *MagneMover LITE* e o *QuickStick LSM*. Ambas são descritas de seguida.

Sistema MagneMover LITE

O sistema *MagneMover LITE* é um sistema transportador magnético com base na tecnologia de um motor síncrono linear. Este sistema apresenta um conjunto de componentes modulares (ver Figura 37). Este princípio modular oferece uma variedade, quase infinita, de opções de *design*, facilitando a adaptação: às necessidades existentes, às eventuais alterações e às reparações em caso de avarias, não comprometendo o sistema como um todo (MagneMotion, n.d.-a). Além disso, permite diversas combinações e possibilita movimentações horizontais, verticais e invertidas (MagneMotion, n.d.-a). O *MagneMover Lite* consegue albergar até nove veículos em trânsito, por metro de pista, e está dotado de um sistema anti colisões, de forma a prevenir eventuais danos nas cargas transportadas (MagneMotion, n.d.-a).

O sistema *MagneMover LITE* é composto por aço inoxidável flexível, o que facilita a sua limpeza. Além disso, existe uma monitorização da localização dos seus diversos componentes (MagneMotion, n.d.-a). A monitorização é possível com a utilização de sensores, sendo que o número destes sensores é, comparativamente aos sistemas de transporte convencionais, significativamente reduzido, diminuindo os custos operacionais (MagneMotion, n.d.-a).

Outras vantagens podem ser enunciadas, nomeadamente as mesmas que são comuns aos modelos *Maglev* de transporte de passageiros, ou seja, a quase inexistência de componentes mecânicos (exemplo: correias, rodas dentadas, caixas redutoras, entre outras), componentes que frequentemente originam custos de manutenção e de funcionamento, e que são comuns nas soluções tradicionais (MagneMotion, n.d.-a).



Figura 37 – Sistema modular do *MagneMover LITE* (Fonte: (MagneMotion, n.d.-a))

No domínio das aplicações práticas em que este sistema pode operar podem-se enumerar, como exemplo: as aplicações farmacêuticas e o empacotamento de produtos alimentares e de bebidas (MagneMotion, n.d.-a).

A Figura 38 resume as principais características do sistema *MagneMover LITE*.

| | |
|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Características | <ul style="list-style-type: none">• Baseado na tecnologia de um motor síncrono linear• Posicionamento exato em qualquer lugar na pista• Monitorização constante e registo de localização |
| Vantagens | <ul style="list-style-type: none">• Fácil limpeza e manutenção• Configuração flexível devido à sua modularidade• Sistema anti colisões• Reduzidos custos de manutenção e de funcionamento |
| Desvantagens | <ul style="list-style-type: none">• Velocidade máxima de 2 m/s• Acelerações máxima de 2 m/s²• Cargas limitadas a um máximo de 2 kg |

Figura 38 – Resumo das principais características do sistema *MagneMover LITE*

Sistema QuickStick LSM

A outra aplicação identificada é o *QuickStick LSM* (ver Figura 39), que é uma outra solução de transporte de cargas da *MagneMotion Inc.*. Neste sistema, à semelhança do *MagneMover LITE*, a propulsão de cada módulo é realizada através de um MSL (ou seja, motor síncrono linear). Estes módulos são alimentados através de um barramento de corrente contínua (MagneMotion, n.d.-b). Uma das maiores diferenças desta solução, em relação ao sistema *MagneMover LITE*, é a capacidade que esta solução tem para transportar cargas de tamanho e peso superiores.

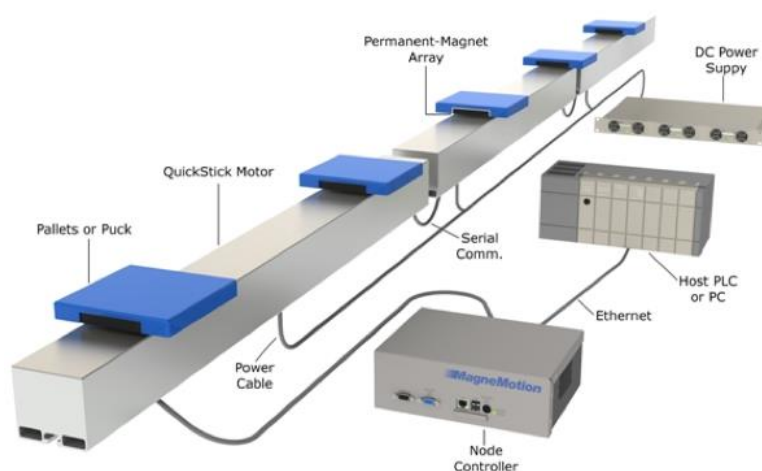
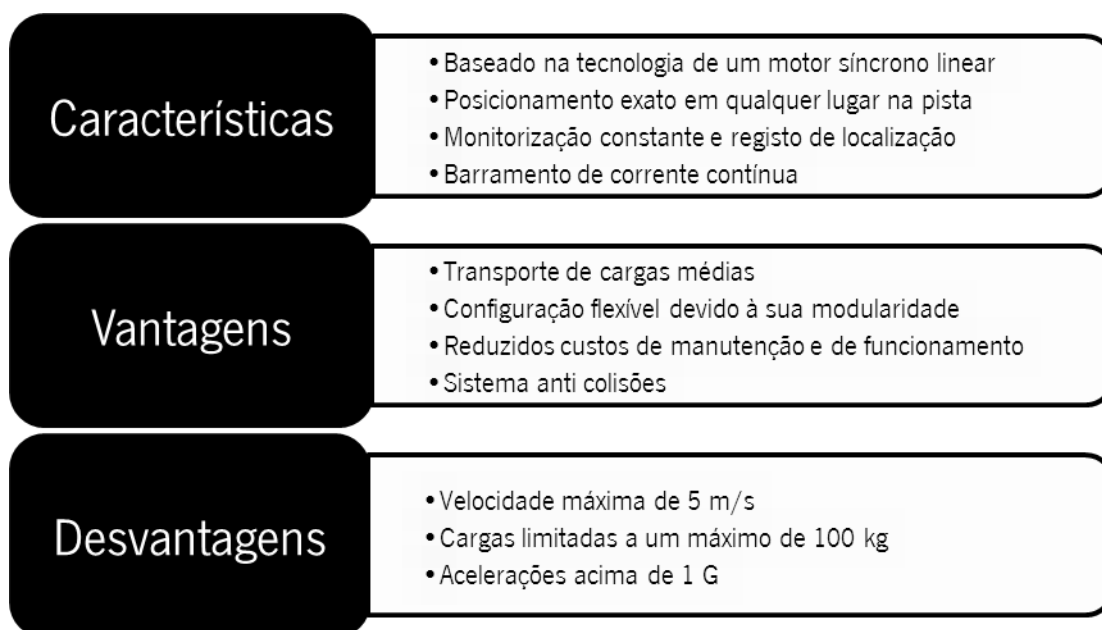


Figura 39 – Componentes do sistema *QuickStick LSM* (Fonte: (MagneMotion, n.d.-b))

Este sistema é munido de módulos de meio ou um metro, que podem ser escolhidos conforme a carga a transportar e as necessidades específicas. Uma outra característica deste sistema prende-se com a disposição dos ímanes permanentes, que pode ser normal ou em *Halbach array* (MagneMotion, n.d.-b).

A Figura 40 resume as principais características do sistema *QuickStick LSM*.

Figura 40 – Resumo das principais características do sistema *QuickStick LSM*

5.1.2. Transportes Externos

No âmbito dos transportes externos, um dos principais interessados em projetos de transporte de mercadorias é a *General Atomics* (GA), empresa Norte-Americana, fundada em 1955 e que tem três eixos de desenvolvimento: energia, transportes e defesa (General Atomics, n.d.). A GA está interessada no estudo do desenvolvimento *Maglev*, não só ao nível do transporte de passageiros e de cargas mas também em outras aplicações, como é exemplo o sistema de lançamento de caças nos porta-aviões da marinha Americana (General Atomics, n.d.).

A solução da GA para o transporte de mercadorias chama-se ECCO (*Electric Cargo CONveyor*), sistema que tem vindo a ser desenvolvido durante a última década. Este é um sistema passivo que apenas utiliza ímanes permanentes na parte inferior do veículo, e utiliza um motor síncrono linear (MSL) para propulsão (General Atomics, n.d.). Esta solução já avaliou a viabilidade através da realização de uma pista de testes em 2006 (General Atomics, n.d.).

³Contentor de Carga Eletromagnético

A GA construiu o seu primeiro sistema *Maglev* de grande escala nos EUA (ver Figura 41), que opera numa pista de 400 metros no *campus* principal da GA, em San Diego (General Atomics, n.d.).



Figura 41 – Primeiro sistema *Maglev* da GA (Fonte: (General Atomics, n.d.))

Num estudo recente, encomendado pelo Porto de *Los Angeles*, a GA confirmou com este protótipo a viabilidade de construção de um sistema ECCO capaz de mover mais de 5.000 contentores por dia entre os portos de *Los Angeles/Long Beach* e as instalações intermodais (General Atomics, n.d.). A equipa de desenvolvimento do ECCO concluiu que um sistema deste tipo, com uma extensão de 8 km de comprimento, poderá ser construído dentro de um período de quatro anos (General Atomics, n.d.). A GA e a sua equipa verificaram também a viabilidade da construção de um sistema ECCO, dentro de um período de quatro anos (General Atomics, n.d.).

Os elementos constituintes do sistema de levitação (ver Figura 42 – parte II) são os ímanes permanentes de Neodímio ferro boro (NdFeB), dispostos em blocos e divididos em subconjuntos (General Atomics, n.d., 2006). Estes módulos magnéticos são montados no suporte do chassi, como se poderá ver na Figura 42. Não existe, portanto, nenhum sistema de potência ativo no veículo, apenas a utilização de ímanes permanentes, como no modelo *Indutrack*. Este sistema também utiliza a configuração de *Halbach* que, como já referido. A propulsão é realizada através de um motor síncrono linear (MSL), tecnologia também já apresentada nesta dissertação.

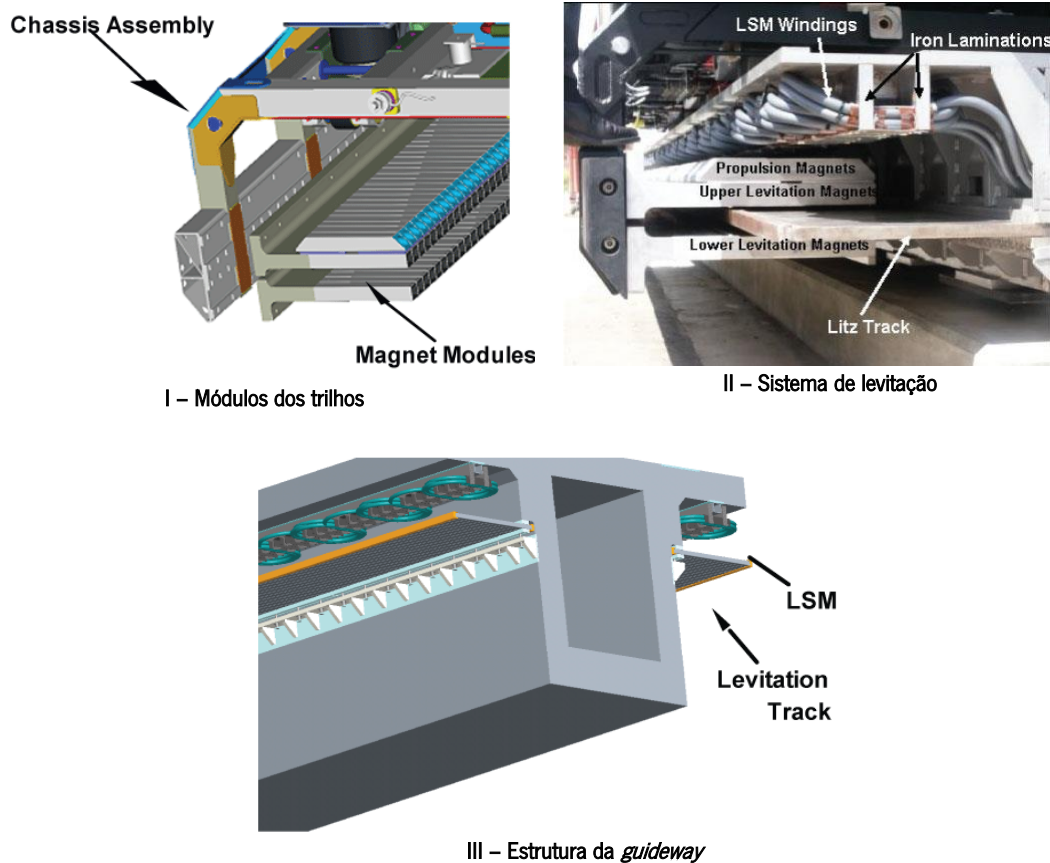


Figura 42 – Principais componentes do sistema ECCO da GA (Fonte: (General Atomics, n.d.))

Uma das vantagens do sistema ECCO é uma nova solução de transporte, que visa atender às necessidades urgentes de soluções mais limpas e mais eficientes no âmbito dos transportes de mercadorias. Além disso, os componentes utilizados na construção deste sistema são mais leves e mais baratos quando comparativamente com outras soluções, bem como a sua complexidade e o seu *design* são vistos de forma mais simplificada (General Atomics, n.d.). Relativamente ao desempenho desta solução, destaca-se a velocidade de 144km/h que este sistema pode alcançar (General Atomics, 2006).

Também a Siemens, a ThyssenKrupp e a *Transrapid* Internacional estão a desenvolver soluções dentro do domínio dos sistemas *Maglev*, nomeadamente na adequação das soluções de transporte de sistemas de passageiros em soluções de transporte de bens e mercadorias (Transrapid International, 2002).



Figura 43 – Protótipo para transporte de bens e mercadoria da parceria Siemens, ThyssenKrupp e *Transrapid*
(Fonte: (Transrapid International, 2002))

5.2. Vantagens e Desvantagens das Soluções Atuais para os Transportes de Carga

5.2.1. Transportes Internos

Ao nível dos transportes internos, apenas duas soluções se destacam quando se refere à aplicação da tecnologia *Maglev*, nomeadamente o sistema *MagneMover* e o sistema *QuickStick*. Em comparação, e apesar da primeira solução ser a mais económica, a segunda solução apresenta uma maior força de propulsão, e, por consequência, pode transportar carga mais pesada. Esta comparação está detalhada nas Figura 38 e Figura 39 já apresentadas.

De um modo geral, as soluções existentes de transportes internos com a tecnologia *Maglev* já se encontram relativamente avançadas, de modo a serem uma alternativa viável, mais económica e mais flexível para este propósito.

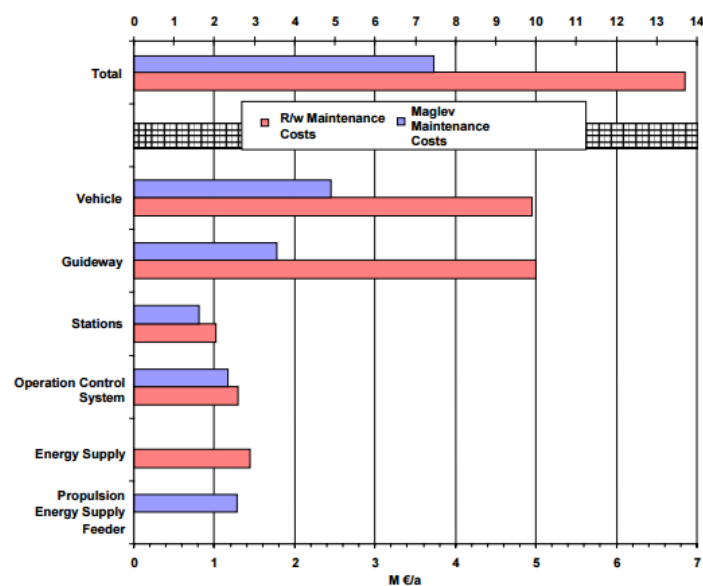
5.2.2. Transportes Externos

No âmbito dos transportes externos de bens e mercadorias, ainda só existe um exemplo significativo que possa ser mencionado, ao contrário do que acontece com o transporte de passageiros, no caso o sistema ECCO. Algumas das principais vantagens deste sistema já foram mencionadas anteriormente. Este exemplo serve para generalizar os potenciais transportes externos de carga que utilizem a tecnologia *Maglev*.

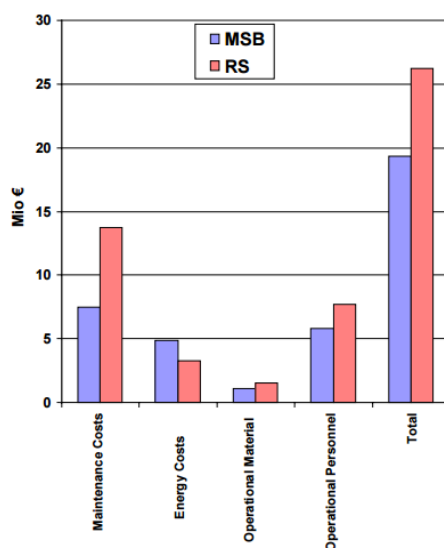
Relativamente aos benefícios técnico-ambientais da tecnologia *Maglev* aplicada ao transporte externo de carga, pode-se afirmar que esta tecnologia: (1) melhora a velocidade e a confiabilidade dos transportes; (2) elimina as emissões de CO₂ nocivas para o meio ambiente; (3) elimina componentes com desgaste rápido (i.e. rodas); (4) reduz a poluição sonora, pois conseguem-se soluções silenciosas; e (5) reduz danos em estradas e/ou outras infraestruturas que sirvam de caminho ao transporte.

Relativamente aos benefícios, esta tecnologia apresenta-se um veículo mais leve, e não necessita de sistemas ativos de energia, utilizando apenas ímanes permanentes. Estes fatores são especialmente importantes para aplicações que se pretendem de alto rendimento, como é o caso do transporte de mercadorias. Além disto, a estrutura – *guideway*, como tem menos peso para suportar, e como existe um *gap* considerável, reduz a complexidade da sua construção. De um modo geral, estas soluções irão permitir reduzir significativamente o custo do transporte de contentores de carga quando comparativamente aos sistemas tradicionais de roda-carril. Os custos de operação e manutenção também são significativamente mais reduzidos.

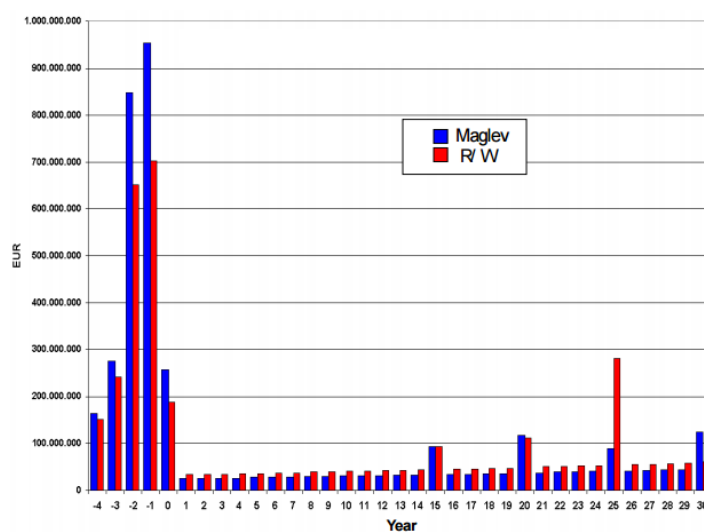
Nos gráficos que se seguem na Figura 44, encontra-se uma comparação relativamente aos diversos tipos de custos dos sistemas ferroviários tradicionais – ou também sistemas roda-carril (R/W) – e dos sistemas *Maglev*.



I – Comparação dos custos de manutenção



II – Comparação dos custos de manutenção e de operação



III – Tendências de custos ao longo do tempo

Figura 44 – Análise de custos de sistemas roda-carril tradicionais e sistemas *Maglev* (Fonte: (Witt & Herzberg, 2005))

Para ultrapassar o elevado investimento inicial, considerado a principal desvantagem da aplicação da tecnologia *Maglev* aos transportes externos de carga, pode-se recorrer a fontes de capitais privados para cobrir uma parte deste investimento. Contudo, é necessário o apoio do setor público para validar totalmente a tecnologia, e para ultrapassar eventuais problemas de direito de passagem.

5.3. Tendências e Desafios Futuros

5.3.1. Tendências da Tecnologia *Maglev*

Uma vez que existem poucos exemplos e literatura sobre aplicação da tecnologia *Maglev* ao transporte externo de cargas, é necessário realizar uma análise das tendências da própria tecnologia *Maglev* no âmbito do transporte de passageiros para se projetar o que se sucederá no domínio dos transportes externos de carga.

É importante destacar que esta tecnologia vive atualmente um momento mediático, e está a despertar inúmeros desenvolvimentos ambiciosos um pouco por todo o mundo. Face a isso, de seguida são apresentados alguns dos exemplos mais conhecidos.

Na China, na universidade *Southwest Jiaotong* em *Chengdu*, foram apresentadas imagens de um inovador sistema *Maglev*, projeto liderado pelo professor Dr. Deng Zigang (RT, 2014). Este sistema ainda se encontra em testes, contudo o que de facto o diferencia é a utilização de um tubo fechado como “pista” (ver Figura 45). Com isto, é possível diminuir a pressão a um décimo da pressão atmosférica, aumentando aproximadamente sete vezes a velocidade para valores superiores a 2000 km/h (RT, 2014).



Figura 45 – Sistema inovador chinês desenvolvido na universidade Southwest Jiaotong (Fonte: (RT, 2014))

Um outro exemplo desenrola-se no Reino Unido (UK), onde existe a intenção de modernizar a rede ferroviária, de modo a obter velocidades superiores entre vários pontos do país. Para tal foi selecionado o sistema *Transrapid* para esta decisão estratégica do país (James, 2005), dando origem ao projeto chamado *UK Ultraspeed* (UK Ultraspeed, 2013).

Na Coreia existe também um exemplo de um sistema *Maglev*, o sistema da Rotem – chamado *Rotem Urban Maglev* –, similar ao japonês HSST (o *Linimo*). Atualmente, já foi desenvolvido um protótipo, e o plano de desenvolvimento que prevê uma linha com 3,5 km de extensão, com cinco estações, com uma velocidade máxima que poderá atingir os 85 km/h (The International Maglevboard, 2005).

Também o Brasil, em parceria com a Alemanha, está a apostar na construção de um veículo urbano que utiliza a tecnologia *Maglev*, chamado *MagLev Cobra* (Maglev Cobra, n.d.). A Universidade Federal do Rio de Janeiro, em parceria com o instituto Leibniz da Alemanha, já apresentaram modelos funcionais em escala reduzida deste novo sistema (Maglev Cobra, n.d.).

5.3.2. Transportes de Carga em Indústria

Relativamente às tendências futuras, relacionadas com os transportes de carga utilizando os princípios da tecnologia *Maglev*, deteta-se uma grande diversidade de notícias de projetos em fase de planeamento, algumas das quais são enunciadas de seguida.

Na Rússia, a companhia de energia nuclear *Rosatom* e a *Russian Railways* (RZD) assinaram um acordo para investigação e desenvolvimento de linhas de transporte de carga em contentores, utilizando os princípios de *Maglev*, para servir de alternativa às linhas ferroviárias convencionais (TASS, n.d.). Os planos são de inicialmente desenvolver uma linha de teste de três quilómetros a partir do Porto de Ust-Luga, segundo o presidente da RZD (TASS, n.d.). O acordo também prevê a criação de uma organização de investigação que englobará as áreas de ensaios não-destrutivos, diagnóstico, análise de vibração, modelação matemática, conservação de energia, purificação de água, esgoto e resíduos industriais.

5.3.3. Principais Desafios

Apesar disto, ainda existem alguns desafios que não são de fácil resolução. A lista seguinte captura os considerados principais, e cuja discussão deverá integrar o corpo da literatura num futuro próximo:

D1: Quão perto os sistemas *Maglev* para transporte externo de carga estão da possibilidade de industrialização?

D2: Como será possível reduzir o valor significativo do investimento inicial?

D3: Qual a melhor combinação de financiamento (público, privado, etc.) para um projeto desta natureza?

D4: Será a redução dos custos de operação e manutenção significativa para justificar o investimento em sistemas *Maglev*?

D5: Como viabilizar a existência de uma rede de transportes externos de carga assentes na tecnologia *Maglev*?

D6: Qual a melhor configuração/modelo (ímãs permanentes, SCM, etc.) para os sistemas de transportes externos de carga com utilização da tecnologia?

D7: Será a tecnologia *Maglev* suficientemente vantajosa para a substituição total ou parcial dos sistemas tradicionais de roda-carril?

D8: Que lições aprendidas dos projetos passados e atuais podem ser retiradas para promover o futuro de projetos desta natureza?

É sobre este desafio final – o D8 – que a primeira secção do próximo capítulo pretende dar um contributo teórico, nomeadamente na apresentação de uma lista de orientações para futuros projetos que envolvam a utilização da tecnologia *Maglev* no transporte de cargas no contexto industrial.

5.4. Síntese do Capítulo

Atualmente, já existem soluções de transporte que utilizam a tecnologia *Maglev*, quer transportes internos quer transportes externos.

No que concerne à utilização da tecnologia *Maglev* nos transportes internos, dois exemplos destacam-se na literatura, nomeadamente: o *MagneMover LITE* e o *QuickStick LSM*. Enquanto o primeiro está mais direcionado para transporte de cargas pequenas (até 2 kg), o segundo é capaz de transportar cargas médias (até 100 kg). Têm, contudo, semelhanças, nomeadamente: ambos são baseados na tecnologia de um motor síncrono linear, ambos têm um *design* modular, e ambos têm um sistema anti colisões. Estes dois exemplos demonstram que a utilização da tecnologia *Maglev* neste contexto é uma alternativa viável, mais económica e mais flexível para este propósito.

No que concerne à utilização da tecnologia *Maglev* nos transportes externos, existem diversas soluções no transporte de passageiros, o que não acontece de igual proporção no transporte de carga em contexto industrial. Nesta última área, o exemplo mais relevante é o sistema ECCO da GA. Este sistema utiliza uma combinação de ímãs permanentes na parte inferior do veículo e um motor síncrono linear (MSL) para propulsão. Diversos estudos têm

vindo a comprovar a viabilidade da construção do sistema ECCO, num período de quatro anos, capaz de mover, por dia, mais de 5.000 contentores de carga.

No transporte externo de carga na indústria, existe uma crescente tendência para a aplicação da tecnologia *Maglev*, todavia existem também muitos desafios que estão por explorar, dos quais se destacam: (1) quão perto os sistemas *Maglev* para transporte externo de carga estão da possibilidade de industrialização?; (2) como será possível reduzir o valor significativo do investimento inicial?; e (3) que lições aprendidas dos projetos passados e atuais podem ser retiradas para promover o futuro de projetos desta natureza?.

(ESTA PÁGINA FOI INTENCIONALMENTE DEIXADA EM BRANCO)

Capítulo 6. Conclusões

Neste capítulo pretende-se fazer uma análise crítica do conteúdo versado nesta dissertação, focando quer na discussão de vantagens que a tecnologia *Maglev* oferece ao transporte de carga em indústria quer no reconhecimento de limitações desta tecnologia.

Inicialmente, são apresentadas orientações relevantes, resultantes da investigação levada a cabo no âmbito desta dissertação, para projetos futuros que envolvam a utilização da tecnologia *Maglev* no âmbito dos transportes externos de mercadorias e bens (carga) em contexto industrial, reconhecendo que estes projetos serão uma aposta para os próximos anos em soluções logísticas de transporte. De seguida, é apresentada uma breve discussão dos resultados obtidos, de modo a refletir sobre a pertinência destes resultados, identificando ao mesmo tempo as principais contribuições desta dissertação. No final, são identificadas, respetivamente, as principais limitações associadas a este trabalho de investigação, e as propostas de trabalho futuro para enriquecer a área de estudo que esteve na génese desta dissertação.

6.1. Orientações para Futuros Projetos

Ao longo do documento, diversos fatores são destacados como decisivos para a aplicação da tecnologia *Maglev* ao transporte externo de mercadorias e bens (cargas) na indústria. Destes fatores destacam-se os seguintes:

- 1) **Peso/força da carga a transportar** – o surgimento de novos ímanes permanentes (exemplo do caso NdFeB), identificados nos novos protótipos, podem ser considerados componentes chave nas capacidades extremamente elevadas no que concerne à relação peso/força magnética.

2) Velocidade (relação distância-tempo) – no âmbito do transporte de passageiros, este fator surge como um dos principais fatores de interesse. Todavia, no caso do transporte interno de cargas em ambiente industrial, não se identifica esse aspeto como relevante, porque a maioria dos casos será de deslocações de distâncias reduzidas. Em oposição, no transporte de cargas externo, esse parâmetro já apresenta relevância de nível mais prioritário, mas objetivamente com grau de relevância inferior ao transporte de passageiros.

3) Manutenção – na tecnologia *Maglev*, não se verifica contacto entre o veículo e a pista, resultando em custos de manutenção substancialmente inferiores, o que, na ótica da realidade industrial e dos negócios, é um aspeto essencial. Outro aspeto a considerar é o facto de que, em caso de um mau funcionamento ou avaria de um elemento de propulsão e controlo, os restantes componentes podem assumir as suas funções, garantindo desta forma a disponibilidade do sistema. Se um dos componentes eletrónicos ficar comprometido, a alta redundância dos sistemas garantirá que o veículo chegue ao seu destino.

4) Melhorias ambientais (eficiência energética, independência do petróleo, energia limpa, diminuição do ruído, etc.) – a energia utilizada nos sistemas *Maglev* é maioritariamente a energia elétrica, podendo mesmo, no caso do sistema *Indutrack*, utilizar apenas ímanes permanentes, tornando quase residual a utilização de energia elétrica – apenas no sistema de controlo. Este ponto representa um aspeto muito importante pois, ao longo das pesquisas efetuadas, foi identificado, na grande maioria dos estudos e artigos, que alerta para a mudança de paradigma energético. De facto, com a diminuição dos combustíveis fósseis e com a necessidade de desenvolver sistemas menos poluentes, ou seja, com menos níveis de emissões de CO₂, tornam este fator muito relevante, e amplamente atrativo ao nível de investimento. Como não se verifica contacto entre veículo e a pista, os sistemas *Maglev* não experimentam resistência considerável, o que torna o sistema mais eficaz. Uma grande diferença prende-se também com a ausência de ruído, uma vez que apenas existe deslocamento de ar, produzindo significativamente menos ruído comparativamente com os transportes convencionais a velocidades equivalentes.

5) **Segurança** – dentro das soluções existentes e do desenvolvimento de protótipos, existe apenas registo de dois incidentes envolvendo projetos *Maglev*, ambos em 2006 (The International Maglevboard, n.d.-c).

6) **Custo/Investimento** – foram identificados, ao longo desta dissertação, diversos obstáculos relativamente ao investimento inicial em projetos *Maglev*, todavia encontram-se benefício a médio e a longo prazo em função dos baixos custos de manutenção, de funcionamento, e, principalmente, de consumos de energia na sua operação.

A Figura 46 sintetiza estes fatores mencionados.

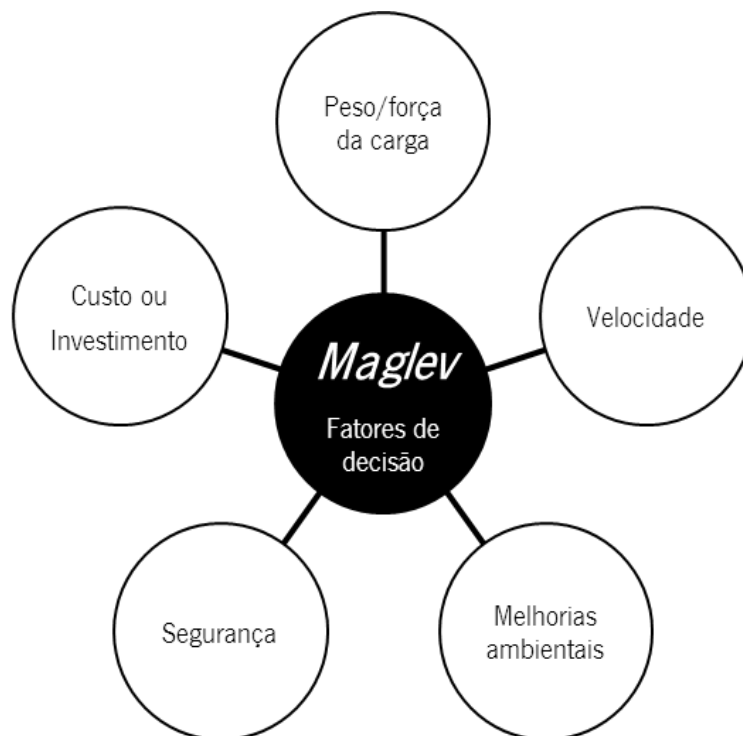


Figura 46 – Resumo dos fatores que influenciam a decisão de aplicação da tecnologia *Maglev*

Um dos objetivos para esta dissertação é o de propor uma lista de orientações para futuros projetos que envolvam a utilização da tecnologia *Maglev* em transporte de cargas no contexto industrial. Depois de tudo já referido, é possível apresentar esta lista (ver Tabela 6).

Tabela 6 – Lista de orientações para projetos futuros envolvendo a tecnologia *Maglev* em transportes de carga no contexto industrial

| Recomendação | |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| R1. | Promover parcerias, nacionais e internacionais, entre entidades públicas e entidades privadas para viabilizar projetos envolvendo a tecnologia <i>Maglev</i> . |
| R2. | Reunir um conjunto chave de empresas industriais para potencial uma rede de transportes <i>Maglev</i> , juntamente com a R1. |
| R3. | Envolver empresas que estejam atualmente com projetos piloto neste domínio. |
| R4. | Construir uma rede lógica e física de transporte utilizando tecnologia <i>Maglev</i> . |
| R5. | Reconhecer que estes projetos são uma aposta a longo prazo, e que o prazo viável mínimo está atualmente nos 4 anos. |
| R6. | Promover uma excelente gestão de risco, pois existem impactos significativos e que devem ser monitorizados, nomeadamente ao nível financeiro e ambiental. |
| R7. | Reconhecer que muitos dos princípios e requisitos dos sistemas <i>Maglev</i> estão direcionados para o transporte de passageiros, sendo que, no transporte de carga, estes têm de ser repensados e repriorizados. |
| R8. | Os impactos positivos deste projeto devem ser justificados à luz de dimensões como: rapidez, segurança, fiabilidade, melhorias ambientais, reduzida manutenção, e ecologia. |
| R9. | A tecnologia EDS tem argumentos sólidos para ser considerada privilegiada para o transporte externo de mercadorias e bens (cargas). |

As orientações, sintetizadas na Tabela 6, são um importante contributo para o corpo de literatura, pois este é indiscutivelmente escasso no que diz respeito à utilização da tecnologia *Maglev* no âmbito dos transportes externos de carga.

6.2. Discussão de Resultados

Ao longo de todo o documento já foram apresentados os diferentes tipos de tecnologia existente nos sistemas *Maglev*. Também ficou evidente, ao longo do documento, que o interesse nesta tecnologia tem aumentado significativamente nos últimos anos, surgindo vários estudos e protótipos que sugerem o desenvolvimento de novos conceitos nesta área.

Olhando para as diferentes tecnologias – EMS, EDS e EDS –, e apesar de anteriormente se referir a força magnética dos ímanes permanentes como limitativa, em relação à sua capacidade, é um importante desenvolvimento nos últimos anos que permitiu o aumento significativo dessa mesma capacidade, permitindo que aos ímanes permanentes uma elevação de cargas de peso muito superior. Este desenvolvimento originou o último modo de suspensão enunciado: o EDS – onde o sistema *Indutrack* utiliza os ímanes permanentes da liga de neodímio-ferro-boro.

Dentro do domínio dos transportes internos utilizados na indústria, foram identificadas soluções já com a utilização da tecnologia *Maglev*. Estas soluções realizam apenas o transporte de materiais/componentes de peso reduzido. Para tal, estas soluções utilizam sistemas sem elementos de ativação de energia, servindo-se apenas de ímanes permanentes, o que faz com que estes sistemas sejam de complexidade mais reduzida, comparativamente às soluções *Maglev* que utilizam eletroímãs ou supercondutores. Isto é possível em função força magnética dos ímanes permanentes terem a capacidade de levitar o peso dessas cargas. Ao nível energético e de custos de manutenção, este tipo de sistemas representa uma clara vantagem, comparativamente aos meios mais tradicionais de transporte. Como aspeto menos positivo, a literatura refere sobretudo o investimento inicial significativo.

Dentro do domínio dos transportes externos de carga utilizados na indústria, ainda são escassos os exemplos que podem ser explorados, sendo o mais construtivo o exemplo do sistema ECCO. A evolução da tecnologia *Maglev* nos transportes externos tem sido maioritariamente realizada no transporte de passageiros (exemplos: sistema HSST; sistema *Transrapid*; sistema MLX01; e sistema *Inductrack*). Contudo, e tendo em conta os seus benefícios, prevê-se que nos próximos anos esta tendência seja alterada.

É, contudo, importante reconhecer que existem limitações na utilização da tecnologia *Maglev*. Uma das principais prende-se com a compatibilidade com esta tecnologia com as redes existentes de transporte. Exemplo disso, é que os comboios *Maglev* atualmente em operação não são compatíveis com as infraestruturas que servem os caminhos ferroviários (trilho e *guideway*). Isto implica que seja necessário uma nova infraestrutura para as suas rotas, tornando o investimento inicial mais significativo. Relativamente aos comboios de alta velocidade – como o TGV (*Train à Grande Vitesse*) –, que podem ser vistos como uma alternativa aos de *Maglev*, estes são capazes de se deslocar nas infraestruturas rodoviárias existentes, embora nem sempre com a sua velocidade máxima.

Apesar de, ao longo deste documento, ter-se dividido o tipo de transportes no universo industrial em transportes internos e transportes externos, ao nível global faz todo o sentido uma análise mais focada na realidade dos transportes externos. Isto deve-se à mudança de paradigma de paradigma que estes podem proporcionar, nomeadamente ao nível energético, na globalização e nas questões ambientais.

Atualmente, o transporte externo de cargas no contexto industrial é maioritariamente rodoviário. Segundo a PwC (2013), e numa ótica estratégica para exportar para os principais mercados mundiais, os meios mais adequados são o marítimo e o ferroviário, e para a mudança de paradigma o Governo português deverá ter aqui um papel fundamental, como entidade facilitadora, reorganizando e dando apoio à dinamização das infraestruturas de suporte à exportação.

A posição geográfica de Portugal não tem os mesmos benefícios da centralidade europeia, como é o caso da Alemanha ou da França. Contudo, a nível estratégico, a ligação Europa-África-Brasil, Portugal pode ser um ator relevante, sendo que esta importante ligação atlântica, almejada política ou economicamente, não é passível de ser atingida sem uma forte integração continental europeia. Esta centralidade atlântica de Portugal depende: da via de revitalização do setor industrial, da geração de fatores de competitividade e de diferenciação, e da criação de uma rede integrada e eficiente de transportes marítimos, operações portuárias e ligações ferroviárias, idealmente recorrendo à tecnologia *Maglev*, que nos aproxime rapidamente, e a custos competitivos, da Europa, da África e do Brasil, e até mesmo da Ásia.

Em relação às questões relacionadas com o custo de energia, estas representam um elevado e crescente peso para a generalidade das empresas. Esta situação pode, num futuro próximo, tornar inviável a algumas empresas a continuação da sua atividade. Os custos elevados são uma das grandes e atuais preocupações das empresas exportadoras portuguesas. Nos últimos anos, Portugal tem promovido o aumento das exportações e a diminuição das importações, e consequentemente começou-se a verificar problemas relativos à adequação das infraestruturas de suporte, uma vez que as empresas exportadoras têm custos de transporte mais agravados. A aposta do Governo português na fiscalidade verde poderá ser uma oportunidade de sensibilizar o Governo para esta questão.

Em síntese, é possível concluir que os quatro principais objetivos desta dissertação foram atingidos, nomeadamente: (1) foi apresentado um estado da arte detalhado no âmbito dos sistemas *Maglev*, dando a conhecer as tecnologias de ponta; (2) foram descritas as principais vantagens e desvantagens desta tecnologia; (3) foi apresentado o estado da arte no âmbito dos transportes externos de carga em ambiente industrial; e (4) foram identificadas

nove orientações chave que poderão determinar o sucesso de um projeto que envolva a tecnologia *Maglev*.

6.3. Limitações

Cada trabalho de investigação tem as suas próprias limitações. Este não é, certamente, exceção. A principal limitação que deve ser reconhecida está relacionada com a componente apenas teórica desta dissertação. Apesar das tentativas, não foi possível ter acessos a profissionais ou a empresas que participaram em projetos piloto de utilização da tecnologia *Maglev*. Isto significa que esta dissertação foi apenas baseada na literatura existente, ao nível científico e ao nível comercial. Em particular, este último nível não carece do rigor do nível científico, pois, por exemplo, não há qualquer mecanismo de revisão, como acontece no nível científico em que a produção científica tem, pelo menos, um processo de *peer review*.

6.4. Trabalho Futuro

No futuro, propõem-se avaliar, através de um questionário, o interesse de empresas industriais, portuguesas e internacionais, em utilizar a tecnologia *Maglev* para transporte externo de mercadorias e bens (cargas), de modo a identificar *drivers* e preocupações relacionados com esta tecnologia.

(ESTA PÁGINA FOI INTENSIONALMENTE DEIXADA EM BRANCO)

Referências

- Abel, E., Mahtani, J., & Rhodes, R. (1978). Linear machine power requirements and system comparisons. *IEEE Transactions on Magnetics*, 14(5), 918–920.
- Allen, G. J., & Albala, K. (2007). *The business of food: encyclopedia of the food and drink industries* (p. 439). USA: Greenwood Publishing Group.
- Alvarenga, A. C., & Novaes, A. G. N. (2000). Logística aplicada: suprimento e distribuição física. *Edgard Blucher*.
- American Maglev. (2006). Zero Emission Transportation. Retrieved December 16, 2014, from <http://american-maglev.com/maglev/>
- Antlauf, W., Bernardeau, F. G., & Coates, K. C. (2004). Fast Track: The High-Speed Magnetic Levitation Rail Line now in Operation in Shanghai, The First of its Kind in the World, Demonstrates That This Extraordinary Technology Can Move People in a Way That is Fast, Reliable, and Cost Effective. *Civil Engineering Magazine*, 74(11), 36–43.
- Ballou, R. H. (2001). *Gerenciamento da cadeia de suprimentos: planejamento, organização e logística empresarial*. Bookman.
- Barbosa, L. S. (2010). *FEM-ABC Aplicado à Solução de Problemas de Espalhamento Eletromagnético*. CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS. Retrieved from http://www.files.scire.net.br/atricio/cefet-mg-pgmmmc_upl/THESIS/20/lucianosilvabarbosa.pdf
- Bezerra, V. A. (2006). Maxwell, a teoria do campo e a desmecanização da física. *Scientia & Studia*, 4(2), 177–220. Retrieved from http://www.scientiaestudia.org.br/revista/PDF/04_02_02.pdf
- Brain, M., & Looper, L. (2000). How Electromagnets Work. Retrieved March 18, 2015, from <http://science.howstuffworks.com/electromagnet3.htm>
- Branício, P. S. (2001). Introdução à Supercondutividade, Suas Aplicações e a Mini-Revolução Provocada Pela Redescoberta do MgB2: Uma Abordagem Didática. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 23(4). Retrieved from http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172001000400004

- Carvalho, C. (2007). *A História da Indução Eletromagnética Contada em Livros Didáticos de Física*. Universidade Federal do Paraná.
- Cassat, A., & Jufer, M. (2002). MAGLEV projects technology aspects and choices. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 12(1), 915–925.
- Castro, R. (2012). *Sistema de Propulsão Magnético Aplicado ao Transporte de Cargas*. Universidade do Minho.
- Cho, D., Kato, Y., & Spilman, D. (1993). Sliding mode and classical controllers in magnetic levitation systems. *Control Systems, IEEE*, 13(1), 42–48.
- CiA, C. in A. (n.d.). Trains and rail vehicles. Retrieved February 20, 2015, from <http://www.can-cia.org/index.php?id=189>
- CNRS, I. de P., SFP, S. F. de P., & RTRA, R. thématique de recherche avancée. (n.d.). Levitation: A surprising effect. Retrieved January 07, 2015, from <http://www.supraconductivite.fr/en/index.php#supra-levitation>
- Du, H., & Pepka, G. (2007). Position and Level Sensing Using Hall Effect Sensing Technology. *Emerald Group Publishing Limited*, 27(1), 29–34.
- Eastham, A., & Hayes, W. (1988). Maglev systems development status. *Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE*, 3(1), 21–30.
- Enel. (2014). Magnetismo. Retrieved March 01, 2015, from http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/conceptos-basicos/magnetismo
- European Commission. (2008). *Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council laying down the framework for the deployment of Intelligent Transport Systems in the field of road transport and for interfaces with other transport modes*.
- Eurostat. (2009). Panorama of Transport.
- Fleury, P. F. (2002). Gestão Estratégica do Transporte. *Revista Tecnológica*, 82.
- França, A. C. (2013). *Trasnporte de Materiais* (p. 14). Curso de Engenharia Química.
- Fujie, J. (1999). An advanced arrangement of the combined propulsion, levitation and guidance system of superconducting Maglev. *IEEE Transactions on Magnetics*, 35(5), 4049–4051.
- General Atomics, G. (n.d.). ECCO. Retrieved April 17, 2015, from <http://www.ga.com/ecco>

- General Atomics, G. (2006). *Conceptual Design Study for the Electric Cargo Conveyor (ECCO) System* (p. 82). Presented to The Port of Los Angeles. Retrieved from [http://www.ga.com/websites/ga/docs/transportation/ecco/Conceptual Design Study for the ECCO System_06_15_06.pdf](http://www.ga.com/websites/ga/docs/transportation/ecco/Conceptual_Design_Study_for_the_ECCO_System_06_15_06.pdf)
- Guerra, A., Reis, J. C., & Braga, M. (2004). Uma Abordagem Histórico-Filosófica para o Eletromagnetismo no Ensino Médio. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física, Florianópolis*, 21(2), 224–248.
- Guimarães, M. da S. (2010). *ELETROMAGNETISMO: Início dos estudos eletromagnéticos e suas aplicações tecnológicas*. Universidade Federal do Amapá. Retrieved from <https://fisicaalemdaunifap.files.wordpress.com/2014/01/2010-hilkias-marcio-eletromagnetismo-inicio-dos-estudos-eletromagn3a9ticos-e-suas-aplicac3a7c3b5es-tecnolc3b3gicas.pdf>
- Halbach, K. (1985). Application of permanent magnets in accelerators and electron storage rings. *Journal of Applied Physics*, 57(8), 3605. doi:10.1063/1.335021
- Harding, J. T. (2004). The Federal Maglev Program. USA. Retrieved from http://magnetbahnforum.de/picture/PDF/IMB_1034_Harding-John-Federal_Maglev_Program_US_Government_Fed_Railroad_Admin-Oct_2004.pdf
- He, J. L., Rote, D. M., & Coffey, H. T. (1993). Applications of the dynamic circuit theory to maglev suspension systems. *IEEE Transactions on Magnetics*, 29(6), 4153–4164.
- Hoburg, J. F. (2004). Modeling maglev passenger compartment static magnetic fields from linear Halbach permanent-magnet arrays. *IEEE Transactions on Magnetics*, 40(1), 59–64.
- IPT, Instituto de Pesquisas Tecnológicas. (2011) Patente em ímãs: Projeto de reprocessamento de materiais magnéticos aponta caminho para superar gargalo no fornecimento de terras raras. Retrieved from http://www.ipt.br/noticias_interna.php?id_noticia=430
- James, A. (2005). *UK Ultraspeed 500hm/h ground transport for Britain* (p. 38). UK.
- Jung, J. (2010). *Armazenamento de energia em Smart Grids*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Retrieved from <http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/33071>
- Junior, R. F. D. S. (2006). O Transporte Rodoviário De Cargas Em Cidades Médias No Contexto Atual: O Caso Do Estado De São Paulo–Brasil E De Portugal. *Formação*, 1(13), 295–326.
- Kassim, N. A., Shaikh, R. A., Zainal, N. A., & Khairulanam, K. (2008). Maglev Suspension Systems. Retrieved February 16, 2015, from <http://emt18.blogspot.pt/2008/10/maglev-suspension-systems.html>

- Kubota, K., Yasuda, Y., Fujino, M., & Ishimoto, S. (2005). The First HSST MAGLEV Commercial Train in Japan. Retrieved from <http://magnetbahnforum.de/picture/PDF/Kubota - Yasuda - Fujino - Ishimoto - HSST Linimo-2005.pdf>
- Lautso, K., Venäläinen, P., Lehto, H., Hietala, K., Jaakkola, E., Miettinen, M., & Segercrantz, W. (2006). *Outlook for world trade, economic growth, globalisation, and the resulting freight flows, especially between the European Union and Russia* (p. 16).
- Lee, H., Kim, K., & Lee, J. (2006). Review of maglev train technologies. *IEEE Transactions on Magnetics*, 42(7), 1917–1925. doi:10.1109/TMAG.2006.875842
- Lencina, A. (2006). *Propagação de Campos Eletromagnéticos em Meios Materiais Finitos*. Universidade Federal da Paraíba. Retrieved from http://bdtd.biblioteca.ufpb.br/tde_arquivos/5/TDE-2006-10-26T142501Z-41/Publico/arquivototal.pdf
- Lima, M. de. (2006). *Sistema Computacional Baseado na Lei de Biot-Savart (Bsmag) para Cálculo de Campos Magnéticos em Detectores de Metais*. Universidade Federal de Santa Catarina. Retrieved from <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/88709/225375.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Maglev Cobra. (n.d.). Maglev Cobra: O Veículo. Retrieved February 24, 2015, from <http://www.maglevcobra.coppe.ufrj.br/veiculo.html>
- MaglevProject. (2008). Maglev's Performance - Magnetic Levitation. Retrieved February 21, 2015, from <http://maglevproject.no.sapo.pt/magneticlevitation.htm>
- MagneMotion. (n.d.-a). Intelligent Conveyor Systems Fast, Accurate, Programmable. Retrieved April 14, 2015, from <http://www.magnemotion.com/products-and-services/magnemover-lite.cfm>
- MagneMotion. (n.d.-b). The Intelligent Alternative to Traditional Conveyor Systems. Retrieved April 13, 2015, from <http://www.magnemotion.com/products-and-services/quickstick.cfm>
- Marisa Fonseca Diniz. (2012). *Maglev, tecnologia em transportes sustentáveis* (p. 1). Brasil. Retrieved from <http://marisadiniznetworking.blogspot.pt/2014/12/maglev-tecnologia-em-transportes.html>
- Marques, D. (2014). Campo magnético no solenoide. Retrieved March 18, 2015, from <http://www.brasilecola.com/fisica/campo-magnetico-no-solenoide.htm>
- Milano, S. (1879). *Allegro Hall-Effect Sensor ICs* (p. 5). USA.

- MIT, M. I. of T. (2015). MagLev Demonstration. Retrieved January 20, 2015, from <http://ocw.mit.edu/courses/mechanical-engineering/2-003-modeling-dynamics-and-control-i-spring-2005/study-materials/main/>
- Monteiro, S. (1997). *SELEÇÃO DE SISTEMAS DE TRANSPORTE: UM MODELO DE ANÁLISE PARA ATACADISTA-DISTRIBUIDORES*. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO. Retrieved from http://www.coppead.ufrj.br/upload/publicacoes/Sergio_Monteiro.pdf
- Morita, M., & Nagano, H. (2009). Higher Speed Trial of Hsst. In *International Symposium on Speed-up, Safety and Service Technology for Railway and Maglev Systems 2009 (STECH'09)* (p. 4). Niigata Japan. Retrieved from http://magnetbahnforum.de/picture/PDF/IMB_1056_Morita-M_Nagano-H_Higher_Speed_Trial_of_HSST-2009.pdf
- Mundim, K. C. (1997). Lei de Biot-Savart. Retrieved April 20, 2014, from <http://ensinoadistancia.pro.br/EaD/Eletromagnetismo/LeiBiotSavart/LeiBiotSavart.html>
- Oliveira, R. A. H. de. (2013). *Sistema de Frenagem Regenerativa com Motor De Indução Linear do Veículo Maglev-Cobra*. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Ostermann, F., Ferreira, L. M., & Cavalcanti, C. J. H. (1998). Tópicos de Física Contemporânea no Ensino Médio: um Texto para Professores sobre Supercondutividade. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 20(3), 270–288.
- Peixoto, L. (2011). *Aspectos de Projeto de Motores de Indução Monofásicos Aplicados em Compressores Herméticos para Refrigeração*. Universidade de São Paulo.
- Pereira, H. silveira. (2013). As Viagens Ferroviárias em Portugal (1845-1896). *Centro de Investigação Transdisciplinar (CITCEM) Cultura, Espaço e Memória*, 1(1), 25–40.
- Pinto, R. A. S. W. A. (2010). *Gestão de Ocorrências de Trânsito para o Sector de Transporte Rodoviário de Mercadorias*. Universidade Técnica de Lisboa.
- Post, R. F., & Ryutov, D. D. (2000). The Inductrack: a simpler approach to magnetic levitation. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 10(1), 901–904.
- Prevedel, G. E. (2007). *Medida da força de repulsão entre dois campos magnéticos e observação de linhas de campo* (p. 15). Retrieved from http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem1_2007/GuilhermeP_Campoy_RP.pdf
- ProjectoMaglev. (2008). Supercondutividade. Retrieved March 19, 2015, from <http://projectomaglev.no.sapo.pt/supercondutividade.htm>
- PwC. (2013). *Principais desafios da indústria em Portugal - 2013: Uma abordagem coerente para a dinamização do setor* (p. 45). Portugal. Retrieved from

- http://www.pwc.pt/pt/publicacoes/imagens/2013/pwc_principais_desafios_industria.pdf
- Rodrigues, J. (1987). *Electrotecnia: electromagnetismo* (Quarta edi., p. 145). Didactica Editora.
- RT. (2014). China tests 3,000-kph “super-Maglev” train concept.
- Sasakawa, T., & Tagawa, N. (2000). Reduction of magnetic field in vehicle of superconducting maglev train. *IEEE Transactions on Magnetics*, 36(5), 3676–3679.
- Shudo, T., Nakagaki, S., Uchida, T., Yamashita, T., Nakao, H., Sanada, Y., ... Inadama, S. (1997). Study on vibration phenomena of superconducting magnets for MAGLEV. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 7(2), 932–935.
- Silva, D. (n.d.). A Lei de Lenz. Retrieved April 20, 2015, from <http://www.mundoeducacao.com/fisica/a-lei-lenz.htm>
- Silva, N. (2012). *Desenvolvimento de sistema de levitação magnética, controlo e monitorização aplicado ao protótipo de transporte de cargas*. Universidade do Minho. Retrieved from http://intranet.dei.uminho.pt/gdmi/site/arquivo/detalhe_arquivo.php?id=298
- Sinha, P. (1984). Design of a magnetically levitated vehicle. *IEEE Transactions on Magnetics*, 20(5), 1672–1674.
- Sinha, P., Zhou, F., & Kutiyal, R. (1993). Fault detection in electromagnetic suspension systems with state estimation methods. *IEEE Transactions on Magnetics*, 29(6), 2950–2952.
- Strong Magnet Inc. (n.d.). Strong Magnet Co: The Specialist of Permanent Magnets, Rare Earth Magnets, Rubber Magnets. Retrieved March 18, 2015, from http://www.strong-mag.com/NdFeB_MAGNET.htm
- TASS. (n.d.). Rosatom, Russian Railways plan high-speed magnetic levitation train. Retrieved April 20, 2015, from <http://tass.ru/en/russia/732739>
- The International Maglevboard. (n.d.-a). Economics. Retrieved January 07, 2015, from <http://magnetbahnforum.de/index.php?economics-2>
- The International Maglevboard. (n.d.-b). Speed Records. Retrieved January 07, 2015, from <http://magnetbahnforum.de/index.php?Speed-Records>
- The International Maglevboard. (n.d.-c). Transrapid Maglev. Retrieved January 07, 2015, from http://magnetbahnforum.de/index.php?en_faf_transrapid

- The International Maglevboard. (2005). USA MAGLEV PROJECT ROUTE MAPS. Retrieved February 21, 2015, from <http://magnetbahnforum.de/index.php?US-Maglev-Project-Maps>
- ThyssenKrupp. (2008). Transrapid. Retrieved February 09, 2015, from www.transrapid.de
- Transrapid International, (TI). (2002). *High-Tech for "Flying on the Ground": Maglev System Transrapid* (p. 23). Retrieved from http://www.thyssenkrupp.com/documents/transrapid/TRI_Flug_Hoehe_e_5_021.pdf
- U.S. Department of Energy. (2012). Inductrack. Retrieved February 07, 2015, from <http://techportal.eere.energy.gov/technology.do/techID=758>
- UK Ultraspeed. (2013). UK Ultraspeed. 500 km/h ground transport for Britain.
- VRE, V. R. E. (2007). *Got Juice? History of The Juice Train* (p. 2).
- Witt, M., & Herzberg, S. (2005). Technical-economical System Comparison of High Speed Railway Systems, 105. Retrieved from http://magnetbahnforum.de/picture/PDF/IMB_1104_Witt Michael - Herzberg Stefan - Technical-economical System Comparison MagLev-HSR 2005.pdf
- World Heritage Encyclopedia. (n.d.). TROPICANA PRODUCTS.
- Yaghoubi, H. (2012). *Practical Applications of Magnetic Levitation Technology Technology* (pp. 1–56). Retrieved from http://www.maglev.ir/eng/documents/reports/IMT_R_22.pdf
- Yaghoubi, H. (2013). The most important Maglev applications. In *Journal of Engineering*. Hindawi Publishing Corporation.
- Zhang, G., Fang, Y., Song, F., Zhu, G., & Wang, Z. (2004). Optimal design and FEM analysis of the superconducting magnets of EMS-MAGLEV models using Bi-2223 tapes. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 14(2), 1850–1853.